

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.05.011

基于改进模糊层次分析法的龙华港水系水质综合评价

田海翔¹,戴大刚²,俞芳琴²,刘俊¹

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 南京市浦口区水利局,江苏 南京 211800)

摘要:采用改进的模糊层次分析法,构建水质评价模型,分别对龙华港水系 10 条河道的 13 个断面 2011 年 4 月(非汛期)和 8 月(汛期)两个时段的水质监测数据进行评价。结果表明:大部分河流水质达标,汛期水质好于非汛期;评价结果与运用传统方法得到的评价结果基本吻合,并能反映出同一级别下不同断面的水质优劣情况,与实际情况相符合。

关键词:水质评价;模糊层次分析法;龙华港水系

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2013)05-0055-04

Comprehensive evaluation of water quality of Longhuagang River system based on improved fuzzy analytic hierarchy process

TIAN Haixiang¹, DAI Dagang², YU Fangqin², LIU Jun¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Water Conservancy Bureau of Pukou District, Nanjing, Nanjing 211800, China)

Abstract: The improved fuzzy analytic hierarchy process method was used to build a water quality evaluation model, which was applied to the evaluation of water quality monitoring data from 13 sections of ten rivers in the Longhuagang River system in April (the non-flood season) and August (the flood season) of 2011. The results show that the water quality met the standard in most areas, and it was better in the flood season than in the non-flood season. The evaluation results were basically consistent with the results obtained using the traditional method and can better reflect the status of water quality at different cross-sections of the same level, being consistent with the actual situation.

Key words: water quality evaluation; fuzzy analytic hierarchy process; Longhuagang River system

龙华港水系地处上海市徐汇区,主要包括龙华港、漕河泾港、蒲汇塘、东上澳塘港、上澳塘、张家塘港、梅陇港等 7 条骨干河道及北潮港、机场河、三友河等支流,是上海市水利分片综合治理中淀北片控制区的主要水系。其上游端通过新泾港西纳松江来水,北连苏州河,南通淀浦河,其下游端主要由龙华港和张家塘港通往黄浦江。该地区是上海市西南最初的城乡结合部,又是近 10 年高速发展的地区。

2000 年以来,上海市分阶段解决快速工业化和城市化进程中的突出环境问题。合理评价龙华港水系的水质状况,对该地区居民饮用水安全以及上海市今后水环境治理工作有着特殊而重要的意义。

目前,常用的水质评价方法比较多,主要有单因子评价法、综合污染指数法、层次分析法、灰色模型法、模糊综合评价法、人工神经网络法等。模糊综合评价法能够客观地反映水质级别的模糊性和连续性,使综合评价结果具有明显的合理性,但其评价指标权重的确定需要专家的知识 and 经验,具有一定的缺陷,利用层次分析法确定各污染物的权系数,使其更具合理性,更符合客观实际并易于定量表示^[1]。

因此,笔者采用模糊综合法和层次分析法相结合的模糊层次分析法,并适当加以改进,对龙华港水系 10 条河道的 13 个断面 2011 年 4 月(非汛期)和 8 月(汛期)两个时段的水质监测数据进行评价。

作者简介:田海翔(1988—),男,硕士研究生,研究方向为城市水务规划与管理。E-mail:flyingsea2010@163.com

1 模糊层次分析法

1.1 确定指标集 U

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\} \tag{1}$$

式中: $u_i(i=1,2,\cdots,m)$ 为参加评价的第*i*个水质指标的数值; m 为参评水质指标数。

主要选取 DO (u_1)、COD_{Mn} (u_2)、COD (u_3)、BOD₅ (u_4)、NH₃-N (u_5)、TP (u_6)、TN (u_7)、FN (u_8) 和石油类 (u_9) 等 9 个水质指标进行评价。其中 DO 评价指标以数值大为优,即数值越大,水质状况越好;而其余 8 个评价指标刚好相反,以数值小为优^[2]。

1.2 确定评价集 V

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \tag{2}$$

式中: $v_j(j=1,2,\cdots,n)$ 为与 u_i 相对应的第*j*个评价等级; n 为评价等级数。

根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》(表 1),确定水质评价等级为 I、II、III、IV、V 和劣 V 类等 6 个等级^[3]。

1.3 构造模糊关系矩阵 R

由于河流水质污染程度和水质分级标准的模糊性,因此采用线性隶属函数 $F(x)$ ^[4]。

I 级:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x \geq v_{i(j+1)} \\ \frac{v_{i(j+1)} - x}{v_{i(j+1)} - v_{ij}} & v_{i(j+1)} > x > v_{ij} \\ 1 & x \leq v_{ij} \end{cases}$$

II ~ (n-1) 级:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x \geq v_{i(j+1)}, x \leq v_{i(j-1)} \\ \frac{x - v_{i(j-1)}}{v_{ij} - v_{i(j-1)}} & v_{ij} > x > v_{i(j-1)} \\ \frac{v_{i(j+1)} - x}{v_{i(j+1)} - v_{ij}} & x \leq v_{ij} \end{cases}$$

n 级:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x \geq v_{i(j+1)} \\ \frac{x - v_{i(j-1)}}{v_{ij} - v_{i(j-1)}} & v_{i(j+1)} > x > v_{ij} \\ 1 & x \leq v_{ij} \end{cases}$$

$$\tag{3}$$

式中: $v_{ij}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$ 为第*i*个水质指标相对于第*j*级的标准浓度; x 为第*i*个评价因子的实测浓度。

运用传统的模糊层次分析法计算各水质指标的

隶属度时,是通过各水质指标不同等级的上限值相对于评价指标来确定的。这样只能将水质分为 I、II、III、IV、V 等 5 个评价标准(图 1)。这种方法将劣 V 类水质归为 V 类,降低了污染的严重性^[5]。

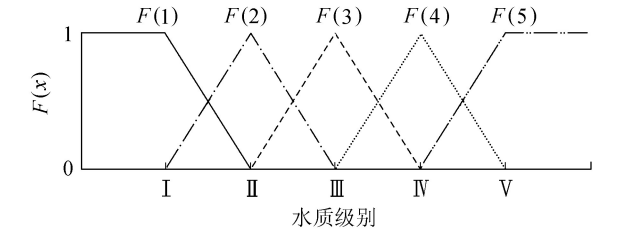


图 1 传统的隶属函数

因此,为了克服传统方法不能评价劣 V 类水质的弊端,拟采用改进的隶属函数^[6],以水质标准上下限的中间值为界限计算隶属度,从而可以得到 6 个隶属函数(图 2)。

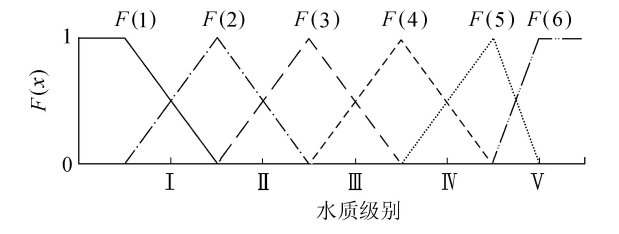


图 2 改进的隶属函数

计算各评价指标对应每一级水质标准的隶属度 F ,从而得到各个断面的模糊关系矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中: r_{ij} 为第*i*个水质指标相对于第*j*级标准的隶属度。

1.4 建立权重分配矩阵 ω

权重 ω_i 为*i*因子在 9 个评价指标中所起的作用大小的度量^[7]。利用层次分析法计算各水质指标之间的权重时,传统方法在构造判断矩阵时采用 1~9 的标度法,专家主观性太强,使评判结果带有片面性;判断矩阵的一致性与人类思维的一致性有显著差异;在进行一致性检验时,如果判断矩阵不具有 consistency,还须重新构建、计算,直到满足 consistency 为止,计算量大,且精度不高^[8]。0.1~0.9 标度法,作

表 1 地表水环境质量标准

评价等级	$\rho(\text{DO})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{BOD}_5)$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{FN})$	$\rho(\text{石油类})$
I 类	≥ 7.5	≤ 2	≤ 15	≤ 3	≤ 0.15	≤ 0.02	≤ 0.2	≤ 0.002	≤ 0.05
II 类	6~7.5	2~4	≤ 15	≤ 3	0.15~0.5	0.02~0.1	0.2~0.5	≤ 0.002	≤ 0.05
III 类	5~6	4~6	15~20	3~4	0.5~1.0	0.1~0.2	0.5~1.0	0.002~0.005	≤ 0.05
IV 类	3~5	6~10	20~30	4~6	1.0~1.5	0.2~0.3	1.0~1.5	0.005~0.01	0.05~0.5
V 类	2~3	10~15	30~40	6~10	1.5~2.0	0.3~0.4	1.5~2.0	0.01~0.1	0.5~1
劣 V 类	<2	>15	>40	>10	>2.0	>0.4	>2	>0.1	>1

为互补矩阵的典型代表,继承了1~9 标度法的优势,发扬了0~1 标度法的长处,与改进的标度法的最初思想比较接近,但表达与处理方法完全不同。0.1~0.9 标度法从实际应用角度出发,从专家和决策者判断角度考虑,注意标度的可读性、可用性、规范性,更符合人们的思维逻辑^[9]。

因此,笔者采用0.1~0.9 标度法给予各评价指标的数量标度(表2)。

表2 0.1~0.9 五标度含义

标度	定义	说 明
0.5	同等重要	两元素相比较,同等重要
0.6	稍微重要	两元素相比较,一元素比另一元素稍微重要
0.7	明显重要	两元素相比较,一元素比另一元素明显重要
0.8	重要得多	两元素相比较,一元素比另一元素重要得多
0.9	极端重要	两元素相比较,一元素比另一元素极端重要
0.1,0.2 0.3,0.4	反比较	若元素 u_i 与元素 u_j 相比较得到判断,则元素 u_j 与元素 u_i 相比较得到的判断为 $r_{ji}=1-r_{ij}$

根据各评价指标相对重要性的两两比较,构建层次分析矩阵 P 如下:

$$P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.25 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.75 & 0.5 & 0.5 & 0.75 & 0.5 & 0.75 & 0.75 & 0.9 & 0.9 \\ 0.75 & 0.5 & 0.5 & 0.75 & 0.5 & 0.75 & 0.75 & 0.9 & 0.9 \\ 0.5 & 0.25 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0.5 & 0.5 & 0.75 & 0.75 \\ 0.75 & 0.5 & 0.5 & 0.75 & 0.5 & 0.75 & 0.75 & 0.9 & 0.9 \\ 0.5 & 0.25 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.25 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0.25 & 0.1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0.25 & 0.1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

该矩阵是由优先判断矩阵改造而成的模糊一致性矩阵,满足一致性条件,因此无需再进行一致性检验^[10]。从而求得各评价指标的权重向量为

$$\omega = (0.094\,2 \quad 0.161\,9 \quad 0.161\,9 \quad 0.103\,1 \quad 0.161\,9 \quad 0.094\,2 \quad 0.094\,2 \quad 0.064\,3 \quad 0.064\,3)^T$$

表3 2011 年龙华港水系不同水期水质评价结果与综合污染指数结果比较

监测断面	4 月(非汛期)			8 月(汛期)		
	B^*	模糊层次 分析法评 价级别	综合污染 指数评价 级别	B^*	模糊层次 分析法评 价级别	综合污染 指数评价 级别
漕河泾港—柳州路桥	5.2936	V	V	5.1196	V	V
龙华港—龙吴路桥	4.9637	V	V	5.0409	V	V
张家塘港—老沪闵路桥	4.8090	V	V	4.7660	V	V
蒲汇塘—漕河泾桥	5.1459	V	V	4.8038	V	V
上澳塘—宜山路桥	4.1695	IV	V	4.3217	IV	V
东上澳塘—桂林路桥	5.0491	V	V	5.1130	V	V
梅陇港—凌云路桥	5.3713	V	劣V	4.7043	V	V
梅陇港—民乐啤酒厂	5.8555	劣V	劣V	5.1230	V	劣V
北潮港—凌云路桥	4.5030	V	V	4.6548	V	V
机场河—龙华机场	5.7601	劣V	劣V	5.7451	劣V	劣V
机场河—龙华水泥厂	2.9642	III	IV	4.1527	IV	V
机场河—工业技术学校	3.8202	IV	IV	3.3820	III	IV
三友河—罗城路桥	5.3817	V	劣V	5.2130	V	V

1.5 确定模糊综合评价矩阵 B

各监测断面的模糊综合评价矩阵 B ,可由单指标权重向量 ω 和模糊判断矩阵 R 复合运算得到:

$$B = \omega \cdot R = (\omega_1 \quad \omega_1 \quad \cdots \quad \omega_m) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (b_1 \quad b_1 \quad \cdots \quad b_n) \quad (5)$$

其中:
$$b_i = \sum_{j=1}^m \omega_j r_{ji} \quad (6)$$

式中: b_j 为隶属于第 j 等级的隶属度; ω_i 为第 i 个水质指标的权重。

实际工程中常用最大隶属度原则来分析结果向量 B ,此原则虽然操作简单,但它舍弃了评判结果向量 B 中的大部分信息,致使 B 中各分量分布比较均匀时,歪曲了被评对象的客观等级^[11]。笔者采用加权平均原则,计算各断面的隶属级别 B^* ,以避免模糊运算中由于取大取小而造成的信息损失,并以此为基准进行排序,确定各监测断面的水质等级。采用加权平均法计算 B^* 的公式为

$$B^* = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{\sum_{j=1}^n b_j^k} \quad (7)$$

式中: k 为待定系数,取 $k=1$ 或 $k=2$ 。

k 表示用于控制较大的 b_j 所起的作用,当 $k=1$ 时,所起作用相同;当 $k=2$ 时,较大的 b_j 所起作用较大。本文取 $k=2$ 。

采用加权平均原则,对2011 年龙华港水系13 个监测断面不同时期的水质评价结果进行分析,得到各断面的 B^* (表3)。

1.6 评价结果

根据 B^* 的计算值,采用四舍五入,确定最终的

评价级别,结果见表3。根据上海市水环境功能区划,龙华港水系水功能区划等级为V类。从表3中可以看出,4月(非汛期),龙华港水系大部分河道水质达标,机场河—龙华水泥厂、机场河—工业技术学校两个断面、上澳塘—宜山路桥断面水质状况较好,均达到了Ⅳ类水以上。但仍有两个断面水质为劣V类,未达标。8月(汛期),除了机场河—龙华机场断面水质为劣V类以外,其余河道断面水质均达标。综合来看,汛期水质好于非汛期。

根据上海市徐汇区水利普查办公室提供的2011年综合污染指数法评价级别(表3),两次水质评价结果基本吻合。同时,应用模糊层次分析法的评价结果,更能反映出同一级别下不同断面的水质优劣情况,与实际情况相符合。

2 结 语

a. 建立了改进的模糊层次分析法的水质综合评价模型,运用该模型对龙华港水系10条河道13个断面2011年4月(非汛期)和8月(汛期)的水质监测数据进行了评价。

b. 在确定隶属度时,针对以往隶属函数存在的不能评价劣V类水的缺点,采用改进的隶属度函数,采用不同级别水质标准的上下限的中间值为界限,从而得到6个隶属度函数,更符合实际研究问题的需要。

c. 在确定评价指标权重时,采用0.1~0.9标度法构造模糊判断矩阵,符合人们的思维逻辑,由优先判断矩阵改造而成的模糊一致矩阵满足一致性条件,无需进行一致性检验,提高了权重的计算精度。

d. 通过对龙华港水系的水质评价,并与上海市徐汇区水利普查办公室提供的2011年综合污染指数法的评价结果进行了对比,发现两次水质评价结果基本吻合。应用模糊层次分析法的评价结果,更能反映出了同一级别下不同断面的水质优劣情况,与实际情况相符合。

参考文献:

[1] 彭祖赠,孙韞玉. 模糊(Fuzzy)数学及其应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2004.

[2] 徐兵兵,张妙仙,王肖肖. 改进的模糊层次分析法在南苕溪临安段水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 2065-2072. (XU Bingbing, ZHANG Miaoxian, WANG Xiaoxiao. Application of an improved fuzzy analytic hierarchy process in water quality evaluation of the South Tiaoxi River, Lin'an Section[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(9): 2065-2072. (in Chinese))

[3] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2): 80-88. (ZHANG Jijun. Fuzzy analytical

hierarchy process [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 14(2): 80-88. (in Chinese))

[4] 杜栋. 论 AHP 的标度评价法[J]. 运筹与管理, 2000, 9(4): 42-45. (DU Dong. Evaluation on the scale of AHP [J]. Operations Research and Management Science, 2000, 9(4): 42-45. (in Chinese))

[5] 田红,杨婧. 改进层次分析法与模糊综合评价的耦合模型在水质评价中的应用[J]. 环境保护科学, 2011, 37(1): 70-72. (TIAN Hong, YANG Jing. Application of IAHP coupling with fuzzy comprehensive evaluation method in water quality evaluation [J]. Environmental Protection Science, 2011, 37(1): 70-72. (in Chinese))

[6] 陈耀辉,孙春燕. 对最大隶属原则有效度的进一步研究[J]. 重庆师范学院学报:自然科学版, 2002, 19(1): 47-49. (CHEN Yaohui, SUN Chunyan. Further study of validity for the maximum subordination principle [J]. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science Edition, 2002, 19(1): 47-49. (in Chinese))

[7] 褚克坚,华祖林,田红. 一种改进的水环境质量模糊层次综合评价模型[J]. 中国科技论文在线, 2009, 4(5): 379-386. (CHU Kejian, HUA Zulin, TIAN Hong. An improved FAHP comprehensive water quality assessment model [J]. Sciencepaper Online, 2009, 4(5): 379-386. (in Chinese))

[8] 穆征,王方勇,李静,等. 基于模糊综合评价模型的河流水质综合评价[J]. 水力发电, 2009, 35(4): 11-13. (MU Zheng, WANG Fangyong, LI Jing, et al. Comprehensive evaluation of river water quality based on fuzzy comprehensive evaluation model [J]. Water Power, 2009, 35(4): 11-13. (in Chinese))

[9] 卢文喜,李迪,张蕾,等. 基于层次分析法的模糊综合评价在水质评价中的应用[J]. 节水灌溉, 2011(3): 43-46. (LU Wenxi, LI Di, ZHANG Lei, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation based on AHP in water quality evaluation [J]. Water Saving Irrigation, 2011(3): 43-46. (in Chinese))

[10] 孙高敏,许武成,郭卉. 基于模糊层次分析法的团沔水质分析[J]. 安徽农学通报, 2012, 18(4): 65-68. (SUN Gaomin, XU Wucheng, GUO Hui. Water quality of comprehensive evaluation by fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) in Tuanjiu Lake [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2012, 18(4): 65-68. (in Chinese))

[11] 郭彦英,邓云峰,任珺,等. AHP 法在地表水水质综合评价指标权重确定中的应用[J]. 兰州交通大学学报:自然科学版, 2006, 25(3): 70-72, 76. (GUO Yanying, DENG Yunfeng, REN Jun, et al. Application of analytic hierarchy process (AHP) method in comprehensive assessment of surface water quality [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University: Natural Sciences, 2006, 25(3): 70-72, 76. (in Chinese))

(收稿日期:2013-05-27 编辑:徐 娟)