

城市水库水质模糊综合评价模型建立与应用

赵晓亮¹, 齐庆杰¹, 赵国智², 郑 娇³

1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁阜新 123000

2. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029

3. 南京理工大学化工学院, 南京 210094

摘要 考虑到城市水库水质样本没有严格的属性, 以及在形态和类属方面存在着中介性, 确定了城市水库水质评价中对人类生理健康影响较大的高锰酸盐指数、生化需氧量、总氮、氨氮、氟化物、总磷、溶解氧等 10 项评价因子; 以第 i 种污染物实测浓度与该污染物各级水质标准值的算术平均值之比作为第 i 种污染因子的权重值, 对各单项权重值进行归一化处理, 建立基于模糊综合评价法的城市水库水质评价模型。最后, 将所建模型应用到阜新市目前饮用水库水质评价中, 结果表明, 所建模型既能有效地判断饮用水源水质类别, 又能确定水体中主要污染物和主要污染源。对不同评价方法评价结果的比较分析体现了所建模型的有效性和良好适用性。

关键词 水质评价; 模糊综合评价; 赋权; 适用性评价

中图分类号 X32

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.11.007

Establishment and Applications of Fuzzy Comprehensive Evaluation Model for City Drinking Water Source Quality Assessment

ZHAO Xiaoliang¹, QI Qingjie¹, ZHAO Guozhi², ZHENG Jiao³

1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China

2. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

3. Institute of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Abstract In view of lack of strict attribute and intermediary in drinking water source form and class attribute, nine assessment factors which have much more influence on human health in drinking water source quality assessment are identified. For example, permanganate index, biochemical oxygen demand, total nitrogen, ammonia nitrogen, fluoride, total phosphorus, dissolved oxygen, etc. The ratio of i -th pollutant measured concentration to average value of its each water quality standard is used as the corresponding weight of i -th factor. And all the factors' weights are treated by normalization before taken into the assessment. Then fuzzy comprehensive evaluation model on water source quality assessment is established and applied to main water source quality assessment in Fuxin City. The results show that fuzzy comprehensive evaluation model on drinking water source quality assessment not only could identify the source water quality level, but also could find out the main pollutants and main pollution sources. The final analysis results of different assessment methods indicate that fuzzy comprehensive evaluation model on drinking water source quality assessment possesses validity and favorable applicability.

Keywords water quality assessment; fuzzy comprehensive evaluation; weight; applicability assessment

0 引言

目前, 中国饮用水安全势态严峻, 饮用水源地水功能不

达标率为 35.6%^[1], 全国 1073 个集中式地表水饮用水水源地中有 25% 的水质不达标^[2]。水源地安全评价是进行水源地水

收稿日期: 2011-11-24; 修回日期: 2012-04-05

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项基金项目 (05L163); 辽宁省教育厅项目 (2009A333)

作者简介: 赵晓亮, 讲师, 研究方向为环境系统模拟与评价, 电子信箱: zhaoxiaoliang2008@126.com

质保护的基础,也是为水处理工艺提供预警的基础^[3]。通过准确评价水源地水质现状,识别水体主要污染物,采取相应的控制和保护措施以及为水厂处理提供相应的预警,可保障水厂出水的安全性和可靠性^[4]。此外,做好城市水库水质评价工作也有利于管理部门更好地了解水源地安全状况,分析水库水质变化趋势,识别主要污染物和分析流域主要污染源的生态风险^[5]。水源系统是一个由多因子构成的复杂系统^[6],其综合评价的指标数量很多,所以对饮用水水质的评价更是对多指标的综合评价^[7]。目前,有关矿井水评价的方法包括灰色聚类法、单因子指数法、综合指数法等,但它们也存在某些方面的不足。如灰色聚类法对隶属同一级别的对象做不到进行更细微识别,可能导致损失大批原始信息^[8];单因子指数法不适用于对较复杂污染现象的评价^[9];综合指数法的评价准则比较主观^[10]。模糊综合评价法的数学模型简单、容易掌握,目前已经应用于大气环境等领域,对地下水水质多因素、多层次的复杂评价问题,模糊综合评价法能够更客观、科学地反映水质情况,但模型的程序计算还有待于进一步实现。

基于城市水库水质总体调查,利用模糊模型的数据划分与不确定隶属度的功能^[11-13]对水源地安全进行预警,这对丰富环境评价技术方法理论与指导城市水库水环境保护措施的实施均具有重要的理论和现实意义。

1 模糊综合评价模型的建立

1.1 建立水质评价因子集合及等级集合

设影响水质的污染因素有 n 个,建立评价对象因素集合 $U=\{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n\}$, 其中 $u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n$ 为参与评价的 n 个评价因子^[14-16]。建立评价等级集合 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_m\}$, 其中 $v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_m$ 为 m 个评价等级。

1.2 建立单因素评判矩阵

在 U 和 V 都给定之后,建立 1 个从 U 到 $F(V)$ 的模糊映射 $f: U \rightarrow F(V), \forall u_i \in U$ 。由 f 可以导出模糊关系^[7],得到模糊矩阵 R ,即

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

R 为单因素评判矩阵, $r_{ij} \in [0, 1]$, (U, V, R) 构成一个综合评判模型^[18]。根据模糊关系的定义, r_{ij} 表示第 i 个评价因子对第 j 评价等级的隶属度。因此,模糊关系矩阵 R 中的第 i 行 $R_i=(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}) (i=1, 2, \dots, m)$ 实际上代表了第 i 个因子对各级环境质量的隶属度;而第 j 列 $R_j=(r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{nj}) (j=1, 2, \dots, n)$ 则代表了各个污染因子对第 j 级环境质量的隶属性。

隶属度可通过隶属函数的计算求得, u_i 属于第 j 级水质的隶属函数,即

$$Y(X) = \begin{cases} 1 & 0 \leq X \leq a_1 \\ \frac{a_2 - X}{a_2 - a_1} & a_1 < X \leq a_2 \\ 0 & X > a_2 \end{cases} \quad (1)$$

1.3 确定各因素的权重

因为每个参与评价的因子对水质影响的贡献率不同^[19],相应有不同的权数分配,所以需要对各因素赋权,组成参与评价因子的权数矩阵 $A=(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)$ 。权重值为

$$a_i = \frac{c_i}{s_i} \quad (2)$$

其中, c_i 为第 i 种污染物实测浓度; s_i 为第 i 种污染物在某种用途水各级标准值的算术平均值。为进行模糊运算,对各单

项权重值进行归一化处理,即 $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ 。归一化公式为

$$\overline{a_i} = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (3)$$

1.4 计算模糊综合评价矩阵 B

求出 R 和 A 后,得到模糊综合评判结果为 $B=A \times R$,记作 $B=(b_1, b_2, \dots, b_m)$,该结果是归一化的^[20]。根据评判结果,取 $B=\max(b_i)$,其中 $i=1, 2, \dots, m$,得到相应的综合评价等级。

2 模糊综合评价法在地表水质评价中的应用

2.1 阜新市闹德海水源水质评价

以 2010 年辽宁阜新市水源地(闹德海水库)为研究对象,依据《地面水环境质量标准》(GB 3838—2002),选取 10 项污染指标进行评价,即污染因子为溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮、总氮、总磷、石油类、挥发酚、氟化物、大肠杆菌、表面活性剂,计算得到的水质监测结果平均值见表 1。

2.2 评价标准

鉴于闹德海水源为饮用水源,执行《地面水环境质量标准》(GB 3838—2002),见表 2。

2.3 应用评价

以闹德海全年水质评价为例,根据式(1)得到矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.14 & 0.86 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.87 & 0.13 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(2)和式(3)得到阜新市闹德海水库上半年各评价因子权重,见表 3。

可得 $A=(0.557 \ 0.12 \ 0.014 \ 0.13 \ 0.033 \ 0.029 \ 0.01 \ 0.084 \ 0.024)$;

$$B=A \times R=(0.557 \ 0.13 \ 0.13 \ 0 \ 0)。$$

由评价结果可以得出,闹德海水库上半年水质为 I 级,同理评价出闹德海下半年水质为 II 级。为验证评价结果的客观性,分别运用综合污染指数、污染负荷比、变权欧式距离模型^[21]



表 1 闹德海水库水质监测结果
Table 1 Monitoring results of Naodehai reservoir water quality

月份	溶解氧 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	高锰酸盐指数 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	氨氮 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	总氮 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	总磷 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	石油类 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	挥发酚 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	氟化物 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	粪大肠菌群 $/\text{L}^{-1}$	阳离子表面活性剂 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
1	13.94	4.78	0.090	—	0.070	0.05	0.001	0.49	70	—
2	11.44	4.46	0.120	0.790	0.020	0.04	0.001	0.37	1	—
3	10.62	3.41	0.012	0.506	0.020	0.03	0.001	0.38	1	—
4	11.64	3.30	0.012	0.500	0.005	0.04	0.001	0.38	1	—
5	8.38	2.98	0.012	0.412	0.050	0.03	0.001	0.42	1	—
6	9.57	3.46	0.142	0.615	0.005	0.03	0.001	0.48	12	0.025
7	8.42	3.77	0.068	0.820	0.080	0.03	0.001	0.40	1	0.025
8	8.11	3.90	0.258	0.360	0.120	0.03	0.001	0.44	10	0.025
9	8.84	4.54	0.110	0.438	0.080	0.03	0.001	0.72	585	0.025
10	12.69	3.80	0.208	0.296	0.020	0.03	0.001	0.62	180	0.025
11	12.48	3.08	0.134	0.202	0.005	0.03	0.001	0.60	175	0.025
12	13.20	3.07	0.062	0.248	0.005	0.03	0.001	0.62	25	—
平均值	10.62	3.69	0.140	0.394	0.052	0.03	0.001	0.57	163	0.025

注:“—”表示 2010 年闹德海水库在 1—5 月份进行水道工程建设,期间停止水质监测工作。
Notes: Waterway Engineering Construction in Naodehai reservoir was carried out during Jan. to May in 2010, meanwhile water quality monitoring was in suspension.

表 2 地表水监测项目标准值
Table 2 Standard values of surface water monitoring items

评价因子	I	II	III	IV	V	平均值
溶解氧 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	7.5	6	5	3	2	4.7
高锰酸盐指数 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	2	4	6	10	15	7.4
氨氮 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.15	0.5	1	1.5	2	1.03
总氮 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.2	0.5	1	1.5	2	1.04
总磷 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.02	0.1	0.2	0.3	0.4	0.204
石油类 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.05	0.05	0.05	0.5	1	0.33
挥发酚 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.002	0.002	0.005	0.01	0.1	0.0238
氟化物 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1	1	1	1.5	1.5	1.2
粪大肠菌群 $/\text{L}^{-1}$	200	2000	10000	20000	40000	14440
阴离子表面活性 剂 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.24

对 2010 年的水质进行评价,具体评价结果见表 4。
不同评价方法对闹德海水库的水质评价结果基本一致。采用变权欧式距离模型得到的上半年评价结果与综合指数法存在差异,这主要是因为变权欧式距离模型中采用的权重值是由污染因子的实测值算得,“凸显”了综合评价结果,而不是由污染因子的各级标准值算得。相比之下,模糊综合评价的结果与综合污染指数以及污染负荷比吻合良好,确定的评价标准等级划分范围灵敏度较高,对认识水质之间细微的差别起着非常重要的作用,客观地体现了水库的实际水质。结合主成分分析法^[22]的评价结果,得出闹德海水库的主要污染因子为总氮、高锰酸盐指数,结论与本文采用权重方法算得的各污染因子具体权重基本一致。水库上游存在 2 座油脂化工厂,另外,大量农村人口、牲畜粪便的管理不当给下游水库带来了负荷,是水库高锰酸钾指数、总氮的主要来源。

表 3 闹德海水库 2010 年上半年各评价因子权重
Table 3 Weights of each evaluation factor of Naodehai reservoir in the first half year of 2010

项目	溶解氧	高锰酸盐指数	氨氮	总氮	总磷	石油类	挥发酚	氟化物	粪大肠菌群	阳离子表面活性剂
实测值 c_i	10.93	3.73	0.065	0.565	0.028	0.04	0.001	0.42	14	0.025
污染物各级标准值的平均值 s_i	4.7	7.4	1.03	1.04	0.204	0.33	0.0238	1.2	14440	0.24
c_i 与 s_i 的比值 W_i	2.33	0.5	0.06	0.54	0.14	0.12	0.04	0.35	0.001	0.1
归一化处理后的权重 $\hat{W}$	0.557	0.12	0.014	0.13	0.033	0.029	0.01	0.084	0	0.024

表 4 闹德海水库水质评价结果

Table 4 Assessment results of Naodehai reservoir water quality

评价目标	综合污染 指数	污染负 荷比	变权欧式 距离模型	模糊综 合评价
闹德海(1—6月)	1.755(I)	9.35	II	I
闹德海(7—12月)	2.25 (II)	11.99	II	II

3 结论

(1) 评价结果表明阜新市闹德海水库 2010 年水质上半年为 I 级,下半年为 II 级。

(2) 结果表明闹德海水库的污染主要由有机污染物和无机污染物共同造成,且阜新县酒厂、长江化工厂、东祥油脂厂、县城生活污水为水库上游的主要有机物污染源;另外,农牧区的大量施肥与喷洒农药同样是构成水库总氮超标的主要原因之一,应该及时采取措施控制水库中氮的收纳总量。

(3) 通过模糊综合评价法在阜新市闹德海水源地下水水质评价中的应用,可以看出该方法不仅能有效判断水质类别,确定主要污染物和主要污染源地,同时又能良好地体现水环境中客观存在的模糊性与不确定性。

参考文献 (References)

- [1] 戴润泉, 臧小平, 邱光胜. 三峡水库蓄水前库区水质状况研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(2): 124-127.
Dai Runquan, Zang Xiaoping, Qiu Guangsheng. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(2): 124-127.
- [2] 陈咏淑, 吴甫成, 吕焕哲, 等. 近 20 年来湘江水质变化分析[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(5): 508-512.
Chen Yongshu, Wu Fucheng, Lu Huanzhe, et al. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(5): 508-512.
- [3] 郭劲松, 王红, 龙腾锐. 水资源水质评价方法与进展[J]. 重庆环境科学, 1999, 18(6): 1-3.
Guo Jinsong, Wang Hong, Long Tengrui. *Chongqing Environmental Science*, 1999, 18(6): 1-3.
- [4] 兰文辉, 安海燕. 环境水质评价方法的分析与探讨 [J]. 干旱环境监测, 2002, 16(3): 167-169.
Lan Wenhui, An Haiyan. *Arid Environmental Monitoring*, 2002, 16(3): 167-169.
- [5] 苏德林, 武斌, 沈晋. 水环境质量评价中的层次分析法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(5): 105-107.
Su Delin, Wu Bin, Shen Jin. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1997, 29(5): 105-107.
- [6] 孙靖南, 邹志红, 任广平. 模糊综合评价在天然水体水质评价中的应用研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(2): 45-48.
Sun Jingnan, Zou Zhihong, Ren Guanping. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2005, 6(2): 45-48.
- [7] 刘硕, 朱建平, 蒋火华. 对几种环境质量综合指数评价方法的探讨[J]. 中国环境监测, 1999, 15(5): 33-37.
Liu Shuo, Zhu Jianping, Jiang Huohua. *Environmental Monitoring in China*, 1999, 15(5): 33-37.
- [8] 郭劲松, 龙腾锐, 霍国友, 等. 四种水质综合评价方法的比较 [J]. 重庆建筑大学学报, 2000, 22(4): 6-12.

- Guo Jinsong, Long Tengrui, Huo Guoyou, et al. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2000, 22(4): 6-12.
- [9] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(3): 321-325.
Xu Zuxin. *Journal of Tongji University: Natural Science Edition*, 2005, 33(3): 321-325.
- [10] 朱静平. 几种水环境质量综合评价方法的探讨 [J]. 西南科技大学学报, 2002, 17(4): 62-67.
Zhu Jingping. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2002, 17(4): 62-67.
- [11] 贺北方, 王效宇, 贺晓菊, 等. 基于灰色聚类决策的水质评价方法[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2002(1): 21-25.
He Beifang, Wang Xiaoyu, He Xiaoju, et al. *Journal of Zhengzhou University: Engineering Science Edition*, 2002(1): 21-25.
- [12] 徐敏, 曾光明, 谢更新, 等. 混沌理论在河流溶解氧预测中的应用初探[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 776-780.
Xu Ming, Zeng Guangming, Xie Gengxin, et al. *Journal of Environmental Science*, 2003, 23(6): 776-780.
- [13] 黄飞飞, 刘璐瑶. 城市空气质量评估与预测[J]. 工业设计, 2011, 8(5): 23-26.
Huang Feifei, Liu Luyao. *Design Ideas*, 2011, 8(5): 23-26.
- [14] 张晓光, 王强, 刘慧, 等. 大连市饮用水水源地生态环境保护管理系统模型[J]. 现代农业科技, 2011(12): 299-300.
Zhang Xiaoguang, Wang Qiang, Liu Hui, et al. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011(12): 299-300.
- [15] 王金凤, 刘臣辉, 任晓明. 基于层次分析法的城市环境绩效评估研究 [J]. 环境科学与管理, 2011, 36(6): 12-16.
Wang Jinfeng, Liu Chenhui, Ren Xiaoming. *Environmental Science and Management*, 2011, 36(6): 12-16.
- [16] 李利, 陈圆. 防城港湾海域水质模糊评价与分析 [J]. 南方国土资源, 2011(5): 55-58.
Li Li, Chen Yuan. *South Land and Resources*, 2011(5): 55-58.
- [17] 汪贞, 李根保, 王高鸿, 等. 基于模糊评价法的洱海稳态阶段分析[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(3): 14-16.
Wang Zhen, Li Genbao, Wang Gaohong, et al. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(3): 14-16.
- [18] 王中民, 张光友. 偏二甲胍有效微生物降解实验条件优选[J]. 中国公共卫生, 2011, 27(9): 44-49.
Wang Zhongmin, Zhang Guangyou. *Chinese Journal of Public Health*, 2011, 27(9): 44-49.
- [19] 杨建卫. 金融生态评价系统设计与实现[J]. 计算机与数字工程, 2011, 39(6): 12-15.
Yang Jianwei. *Computer & Digital Engineering*, 2011, 39(6): 12-15.
- [20] 曹杰, 王文博. 基于层次分析法的煤矿环境本质安全化评价[J]. 科技信息, 2011, 6(20) 44-49.
Cao Jie, Wang Wenbo. *Science & Technology Information*, 2011, 6(20) 44-49.
- [21] 冉延平, 何万生, 夏鸿鸣, 等. 渭河水质的综合标识指数法评价研究 [J]. 徐州工程学院学报: 自然科学版, 2011, 26(2): 49-53.
Ran Yanping, He Wansheng, Xia Hongming, et al. *Journal of Xuzhou Institute of Technology: Natural Sciences Edition*, 2011, 26(2): 49-53.
- [22] 林珍铭, 徐超平, 夏斌, 等. 东营市土地生态安全评价[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(18): 11195-11197.
Lin Zhenming, Xu Chaoping, Xiabin, et al. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(18): 11195-11197.

(责任编辑 孙秀云,马骁骁)