

模糊综合评价在大伙房水库下游水污染风险评价中应用

吴钢, 蔡井伟, 付海威, 王涌翔, 魏晶*, 姜萍, 付晓, 刘阳

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:采用模糊综合评价模型对大伙房库区下游浑河抚顺段在 1996~2004 年间水质状况进行评价. 结果表明, 在 1996~2004 年间该河段水质呈波动性变化; 除 1997、2001、2003 年外, 该河段的 3 个监测断面的年综合评价值属 II 类和劣 III 类水质, 其主要污染物是有机污染物、油类和氨氮; 但污染物变化规律各不相同, 油类和氨氮呈逐年增加趋势, COD 呈波动性变化, BOD₅ 呈现逐年递减趋势.

关键词:水污染; 模糊综合评价; 大伙房流域

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)11-2438-04

Application of Fuzzy Comprehensive Assessment in Risk Assessment of Water Pollution Conditions in Downriver Area of Dahuofang Reservoir

WU Gang, CAI Jing-wei, FU Hai-wei, WANG Yong-xiang, WEI Jing, JIANG Ping, FU Xiao, LIU Yang

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Fuzzy comprehensive model was used to assess water quality state in Hunhe river of Dahuofang reservoir from 1996 to 2004. It was found that the water quality of Hunhe river changed fluctuantly and belonged to II and serious III state besides in 1997, 2001, and 2003. The main pollutants were organic pollutants, oil and ammonia. Concentration of oil and ammonia gradually increased from 1996 to 2004, and COD changed irregularly, while BOD₅ decreased.

Key words: water pollution; fuzzy comprehensive assessment; Dahuofang watershed

水环境风险评价是评价水环境中由于介质传播、自然原因或人类活动引起不良后果事件(如污染或灾害)的发生概率以及在不同概率下事件后果的严重性. 随着人们对环境危险及其灾变的认识日益增强, 灾害性环境污染问题也逐渐引起了环境学家和社会广泛重视, 目前已取得不少成果, 但对宏观水质受污染或严重污染的风险性研究较少^[1, 2]. 风险评价方法主要依靠经验定性判断较多, 定量风险评价方法研究不仅较少, 且实际应用中定量评价方法多以单因子超标倍数或污染因子等权法为主, 同时考虑污染因子不等权性, 模糊性和随机性的综合定量研究则更少^[3, 4]. 本研究以大伙房流域下游浑河抚顺段为对象, 运用模糊矩阵评价其在 1996~2004 年间的水质状况进行评价, 以期为抚顺水环境风险管理提供一定科学依据. 该研究目的是为利用随机过程的马尔可夫链, 对后续的水污染变化趋势进行定量分析^[1]提供基础数据, 并根据评价结果提出该河段水污染防治的预警体系.

1 模糊综合评价数学模型

模糊综合评价是在模糊环境条件下, 考虑多种因素影响, 为了某种目的对一事物做出综合决策的方法. 模糊综合评价数学模型^[1, 5~8]如下:

- (1) 因素集 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$;
- (2) 评判集 $V = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$;
- (3) 构造模糊变换 T_R :

$$F(U) \rightarrow F(V), A \rightarrow A \cdot R = B \quad (1)$$

其中, R 为 U 到 V 的模糊关系矩阵, $R = (r_{ij})_{n \times m}$. 这样, 由 (U, V, R) 三元体构成了 1 个模糊综合评价数学模型. 此时, 若输入 1 个权重集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 其中 a_i 表示 U 中第 i 个因素的权重, 且 $\sum a_i$

收稿日期: 2006-08-04; 修订日期: 2007-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(40473054); 科技部农业科技成果转化资金项目(05EFN216600446)

作者简介: 吴钢(1965~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为恢复生态学和环境管理.

* 通讯联系人, E-mail: weijingrees@126.com

$= 1, (i = 1, 2, \cdots, n)$, 则可以得到 1 个综合评判矩阵 $B = (b_1, b_2, \cdots, b_m)$, 即:

$$B = (b_1, b_2, \cdots, b_m) =$$
$$(a_1, a_2, \cdots, a_n) \begin{pmatrix} r_{11}, r_{12}, \cdots, r_{1m} \\ r_{21}, r_{22}, \cdots, r_{2m} \\ \cdots, \cdots, \cdots \\ \cdots, \cdots, \cdots \\ r_{n1}, r_{n2}, \cdots, r_{nm} \end{pmatrix} \quad (2)$$

如果 $b_k = \max (b_1, b_2, \cdots, b_m)$ 由最大隶属度原则^[2, 3, 8, 9]确定, 则综合评判结果对该事物做出决断 b_k .

2 大伙房库区浑河抚顺段水污染综合评价

2.1 研究区概况

大伙房水库建立在辽宁抚顺浑河上, 流域面积为 5 437 km², 多年评价流量为 52.3 m³/s, 总库容为 21.81 × 10⁸ m³, 设计灌溉面积为 8.6 × 10⁴ hm². 它是以防洪、灌溉、工业和城市生活用水为主, 兼发电、养鱼和旅游等综合性大型枢纽工程, 是沈阳、抚顺等城市群的主要生活饮用水源; 浑河抚顺段干流长度 207.5 km, 流域面积 7 311 km². 由于长期人为活动造成了地表水的严重污染, 甚至在某些河段的污染物具有不可降解性. 因此, 在水资源严重匮乏今天, 充分认识地表水和地下水污染特征、规律, 探求其预防措施, 显得尤为重要.

2.2 模糊评价对象、指标及其权重确定

2.2.1 模糊评价对象和指标确定

根据抚顺市地表水长期监测资料(表 1), 选取 6 种典型污染物对其污染现状和污染特征进行分析, 并对其污染程度进行模糊综合评价. 因素集 $U = \{x_1, x_2, \cdots, x_n\} = \{\text{DO}, \text{COD}, \text{BOD}_5, \text{NH}_4^+, \text{油类}, \text{高锰酸盐指数}\}$, 评价集 $V = \{y_1, y_2, \cdots, y_m\} = \{\text{I}, \text{II}, \text{III}, \text{IV}, \text{V}\}$. 评价指标采用地表水各分级国家标准 GB 3838-2002^[1, 10](表 2).

表 1 1996 ~ 2004 年浑河抚顺段监测指标年平均浓度/mg•L⁻¹

Table 1 Concentration of water quality index in Fushun Hunhe river during 1996 ~ 2004/mg•L ⁻¹						
年份	DO	高锰酸盐指数	COD	BOD ₅	NH ₄ ⁺	油
1996	8.61	3.32	20.76	4.01	1.37	0.45
1997	8.17	4.21	23.05	3.97	2.14	0.85
1998	7.83	5.49	23.76	4.21	2.00	0.36
1999	9.08	4.36	16.80	3.79	1.08	0.24
2000	10.01	4.35	23.10	3.68	1.37	0.30
2001	8.17	3.06	24.52	3.71	2.16	0.20
2002	8.69	3.58	21.44	3.09	1.28	0.12
2003	7.86	3.30	22.94	3.82	2.09	0.09
2004	8.22	3.20	23.41	3.57	1.22	0.10

表 2 地表水质量分类指标/mg•L⁻¹

Table 2 Index of surface water quality classification/mg•L ⁻¹					
项目	等级标准				
	I	II	III	IV	V
DO ≥	(饱和度)90%				
高锰酸盐指数 ≤	2	4	6	10	15
COD ≤	15	15	20	30	40
BOD ₅ ≤	3	3	4	6	10
氨氮 ≤	0.15	0.5	1	1.5	2
油类 ≤	0.05	0.05	0.05	0.5	1

2.2.2 指标权重的确定

由于不同水质指标在水环境污染程度中的作用不仅与它们的实测数据大小有关, 而且与某种用途水中各指标的允许浓度标准有关, 实测数据相同的指标, 其允许浓度标准大的, 对污染程度的影响较小. 因此权重计算公式为:

$$w_i = (c_i/s_i)/(\sum c_i/s_i) \quad (3)$$

式中, c_i 为第 i 类指标在水中的实际浓度, s_i 为第 i 类指标在某种用途水中的浓度标准. 以 1996 年为例进行计算, 将表 1 和表 2 中数据代入公式(3)中, 求得 1996 年权重为 $A = \{0.237\ 6, 0.071\ 6, 0.138\ 2, 0.123\ 2, 0.212\ 4, 0.217\ 9\}$, 同理可求得其它各年度各指标的权重值(表 3).

表 3 1996 ~ 2004 年各指标的权重计算值
Table 3 Weight value of index during 1996 ~ 2004

年份	DO	高锰酸盐指数	COD	BOD ₅	NH ₄ ⁺ -N	油
1996	0.236 7	0.071 6	0.138 2	0.123 2	0.212 4	0.217 9
1997	0.168 4	0.068 1	0.115 0	0.091 4	0.248 8	0.308 3
1998	0.194 7	0.107 2	0.143 0	0.117 0	0.280 5	0.157 6
1999	0.291 8	0.109 9	0.130 7	0.136 1	0.195 7	0.135 8
2000	0.277 0	0.095 0	0.154 4	0.113 6	0.213 8	0.146 2
2001	0.224 8	0.066 0	0.163 3	0.114 0	0.335 1	0.096 8
2002	0.294 8	0.095 4	0.176 1	0.117 1	0.244 9	0.071 7
2003	0.233 5	0.077 0	0.165 1	0.126 9	0.350 4	0.047 1
2004	0.283 2	0.086 5	0.195 2	0.137 4	0.237 1	0.060 6

2.3 模糊关系矩阵的计算

模糊关系矩阵 R 是指各因素在各评价集上的隶属度. 首先确定各单因素在评价集上的隶属函数. 根据分类标准(表 2)可建立高锰酸盐指数对各类等级的隶属函数如下:

$$u_I(r) = \begin{cases} 1 & r \in [0, 2] \\ (4-r)/2 & r \in [2, 4] \\ 0 & r \in [4, +\infty) \end{cases}$$
$$u_{II}(r) = \begin{cases} 0 & r \in [0, 2] \text{ 或 } [6, +\infty] \\ (r-2)/2 & r \in [2, 4] \\ (6-r)/2 & r \in [4, 6] \end{cases}$$
$$u_{III}(r) = \begin{cases} 0 & r \in [0, 4] \text{ 或 } [10, +\infty] \\ (r-4)/2 & r \in [4, 6] \\ (10-r)/4 & r \in [6, 10] \end{cases}$$
$$u_{IV}(r) = \begin{cases} 0 & r \in [0, 6] \text{ 或 } [15, +\infty] \\ (r-6)/4 & r \in [6, 10] \\ (15-r)/5 & r \in [10, 15] \end{cases}$$
$$u_V(r) = \begin{cases} 0 & r \in [0, 10] \\ (r-10)/5 & r \in [10, 15] \\ 1 & r \in [15, +\infty) \end{cases}$$

同理, 可以建立 DO, 高锰酸盐指数, COD, BOD₅, NH₄⁺ 和油对各分类等级的隶属函数. 将表 1 中数据代入隶属函数可得到各指标对各等级的隶属度, 从而得到 1996 年模糊关系矩阵为:

$$R = \begin{pmatrix} 0.643 & 0.366 & 0 & 0 & 0 \\ 0.34 & 0.66 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.152 & 0.848 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.005 & 0.995 & 0 \\ 0 & 0 & 0.74 & 0.26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.99 & 0.01 \end{pmatrix}$$

同理可以计算得到其它各年各指标对各等级的隶属度(表 4).

2.4 结果计算与分析

由公式(1)和(2)得 1996 年的综合评判矩阵

$$B = A \cdot R = A =$$
$$\{0.237\,6, 0.071\,6, 0.138\,2, 0.123\,2, 0.212\,4, 0.217\,9\}$$

$$\times \begin{pmatrix} 0 & 0.643 & 0.366 & 0 & 0 \\ 0.34 & 0.66 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.152 & 0.848 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.005 & 0.995 & 0 \\ 0 & 0 & 0.74 & 0.26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.99 & 0.01 \end{pmatrix}$$
$$= \{0.024\,3, 0.068\,3, 0.361\,6, 0.393\,5, 0.002\,2\}$$

表 4 不同年份各指标对各类的隶属度

Table 4 Subordinate degree of each factor for each classification during 1996 ~ 2004

年份	指标	分类等级				
		I	II	III	IV	V
1996 年	DO	0	0.634	0.366	0	0
	MnO ₄ ⁻	0.34	0.66	0	0	0
	COD	0	0.152	0.848	0	0
	BOD ₅	0	0	0.005	0.995	0
	NH ₄ ⁺ -N	0	0	0.74	0.26	0
	油	0	0	0	0.99	0.01
1997 年	DO	0	0.83	0.17	0	0
	MnO ₄ ⁻	0	0.895	0.105	0	0
	COD	0	0	0.61	0.39	0
	BOD ₅	0	0.03	0.97	0	0
	NH ₄ ⁺ -N	0	0	0	0	1
	油	0	0	0	0.3	0.7
1998 年	DO	0.04	0.96	0	0	0
	MnO ₄ ⁻	0	0.255	0.745	0	0
	COD	0	0.624	0.376	0	0
	BOD ₅	0	0	0.895	0.105	0
	NH ₄ ⁺ -N	0	0	0	0	1
	油	0	0	0.69	0.31	0
1999 年	DO	0	0	0.96	0.04	0
	MnO ₄ ⁻	0	0.82	0.18	0	0
	COD	0	0.64	0.36	0	0
	BOD ₅	0	0.79	0.21	0	0
	NH ₄ ⁺ -N	0	0	0.84	0.16	0
	油	0	0	0.42	0.58	0
2000 年	DO	0	0	0.495	0.505	0
	MnO ₄ ⁻	0	0.825	0.175	0	0
	COD	0	0	0.69	0.31	0
	BOD ₅	0	0.68	0.32	0	0
	NH ₄ ⁺ -N	0	0	0.26	0.74	0
	油	0	0	0.44	0.56	0
2001 年	DO	0	0.83	0.17	0	0
	MnO ₄ ⁻	0.53	0.47	0	0	0
	COD	0	0	0.548	0.452	0
	BOD ₅	0	0.29	0.71	0	0
	NH ₄ ⁺ -N	0	0	0	0	1
	油	0	0	0.333	0.667	0
2002 年	DO	0	0.69	0.31	0	0
	MnO ₄ ⁻	0.21	0.79	0	0	0
	COD	0	0	0.856	0.144	0
	BOD ₅	0	0.91	0.09	0	0
	NH ₄ ⁺ -N	0	0	0.44	0.56	0
	油	0	0	0.844	0.156	0
2003 年	DO	0.035	0.965	0	0	0
	MnO ₄ ⁻	0.35	0.65	0	0	0
	COD	0	0	0.706	0.294	0
	BOD ₅	0	0.18	0.82	0	0
	NH ₄ ⁺ -N	0	0	0	0	1
	油	0	0	0.91	0.09	0
2004 年	DO	0	0.78	0.22	0	0
	MnO ₄ ⁻	0.4	0.6	0	0	0
	COD	0	0	0.659	0.341	0
	BOD ₅	0	0.43	0.57	0	0
	NH ₄ ⁺ -N	0	0	0.44	0.56	0
	油	0	0	0.889	0.111	0

按最大隶属度原则,判定 1996 年浑河抚顺段地表水质为Ⅳ类.同理可确定其他各年浑河抚顺段地表水水质类别(表 5).

从表 5 中可看出,大伙房库区下游浑河抚顺段的水质状态呈波动性变化,但水质状态均为Ⅲ类及其以上.在 1996~2004 期间,除 1997、2001、2003 年外,浑河抚顺段的 3 个监测断面的年综合评价值优

于Ⅴ类水质,Ⅲ(Ⅳ)类水质中主要污染物是有机污染物、油类和氨氮.造成浑河抚顺段水污染呈波动性变化的原因和影响因素是多方面的,主要有:①上游水质的好坏直接影响库区及其下游的水质,据不完全统计仅上游的新宾、清原两县人口就达到 64.8 万人,而到目前为止还没有一座污水处理场,大量生活污水不经处理直接排放,是造成下游水质污染(有

表 5 1996~2004 年间浑河抚顺段水质状态
Table 5 Water quality condition of Fushun Hunhe river during 1996~2004

年份	I	II	III	IV	V	所属类别
1996	0.024 344	0.218 330 2	0.361 617 8	0.393 529	0.002 179	Ⅳ
1997	0	0.203 463 5	0.194 586 5	0.137 34	0.464 61	Ⅴ
1998	0.007 788	0.303 48	0.347 091	0.061 141	0.280 5	Ⅲ
1999	0	0.281 285	0.596 967	0.121 748	0	Ⅲ
2000	0	0.155 623	0.416 544	0.427 833	0	Ⅳ
2001	0.034 98	0.250 664	0.240 878 8	0.138 377	0.335 1	Ⅴ
2002	0.020 034	0.385 339	0.420 939 4	0.173 688	0	Ⅲ
2003	0.035 122 5	0.298 219 5	0.263 479 6	0.052 778	0.350 4	Ⅴ
2004	0.034 6	0.331 878	0.427 456 2	0.206 066	0	Ⅲ

机物污染)主要因素之一^[11, 12].另外,流域上游农田施用农药和化肥也是导致水质污染的一个重要因素.②流域内库区本身的污染,主要包括网箱养殖;藻类死亡;底泥释放;旅游业.该库区有大型网箱养殖场,投放饵料和鱼所排放粪便都会导致库区有机物和氮磷污染的主要原因^[12];大量藻类死亡,通过微生物分解所产生氮磷污染也是不可忽视原因.③下游地区的水环境质量除了上游和库区来水水质影响外,下游地区本身的工业污水和生活污水直接排入河段内和下游水量的变化(主要是指丰、枯、平水期).在浑河抚顺段内油类超标主要集中在枯水期,除上游来水水质较差外,同时库区水量相应较少,也是河段内各种游船活动的旅游旺季,因此形成油类污染带,且空间变化与其它污染物呈反向趋势.

3 结论

- (1) 本研究运用模糊评价矩阵对浑河抚顺段各水质指标建立了合理的隶属函数,保证了评价结果的客观、准确;通过环境质量分级,使得结论较为明确,便于管理部门和公众接受.
- (2) 浑河抚顺段在 1996~2004 年间水质主要呈Ⅲ类和劣Ⅲ类水质,其主要污染物是油类、氨氮和有机物;但各污染物变化规律各不相同,油类和氨氮呈增加趋势,COD 呈波动性变化,BOD₅ 呈递减趋势.
- (3) 模糊综合评价能够较为客观地评价地表水环境现状,这为该河段水资源管理和科学利用提供新思路和新方法.但本研究仅选取了 DO、高锰酸盐

指数、COD、BOD₅、氨氮和油类 6 种地表水污染指标.如果再增加地表水污染指标,增加年份,增加同等规模的河流,其评价结果将更加准确客观地反映河流的水环境现状.

参考文献:

[1] 郑文瑞,王新代,纪昆,等.非确定数学方法在水污染状况风险评价中的应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2003,33(1):59~62.

[2] 杨林,闫娥,仁杰,等.模糊综合评价在水污染控制中的应用[J].青海师范大学(自然科学版),2004,(2):49~51.

[3] 吴文业,戈建民,黄奕龙.应用灰色关联分析进行城市地表水环境质量评价[J].世界地质,2000,19(1):53~56.

[4] 刘华祥,李永华.东胡富营养化的模糊评价研究[J].水资源保护,2006,22(3):28~30.

[5] 丁中振.模糊数学方法在环境空气质量综合评价中的应用[J].河南科学,2003,21(6):801~804.

[6] 杨伦标.模糊数学原理及应用[M].广州:华南理工大学出版社,1993.

[7] 袁东,付大友,袁基刚.聚类分析法在大气环境质量评价中的应用[J].四川理工学院学报(自然科学版),2004,17(3):167~176.

[8] 袁静,施介宽,麻永尧.模糊聚类理论在大气环境质量评价中的应用[J].东华大学学报(自然科学版),2001,27(1):95~97.

[9] 陆海军,梁冰,肖利萍,等.露天煤矿矸石山对地下水污染的模糊综合评价[J].能源环境保护,2005,19(6):61~65.

[10] 邢爱国,王仰让.大气环境质量的灰色聚类法[J].环境保护科学,1999,26(4):29~31.

[11] 杨旭东,李伟,马学军.模糊评价法在沧州市区地下水脆弱性评价中的应用[J].安全与环境工程,2006,13(2):9~12.

[12] 马志远.抚顺城区地下水污染的现状特征及其综合评价[J].辽宁城乡环境科技,2003,23(6):40~44.