

水环境质量评价的模糊贴近度方法

张文鸽¹, 管新建², 徐清山³

(1. 黄河水利科学研究院水资源研究所, 河南 郑州 450003; 2. 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002; 3. 安阳市水利局, 河南 安阳 455000)

摘要 :分析了模糊贴近度方法用于区域水环境质量评价的基本步骤,并以宁夏水环境质量评价为实例,探讨了模糊贴近度方法在水环境质量评价中的应用。实例表明,基于模糊贴近度的区域水环境质量评价原理直观,计算方法简单,能较完整地反映水环境质量污染程度,是一种实用而准确的评价方法。

关键词 :水环境;贴近度;隶属函数;环境评价

中图分类号 :X824 文献标识码 :A 文章编号 :1004-693X(2006)02-0019-04

Water environment quality evaluation based on fuzzy nearness method

ZHANG Wen-ge¹, GUAN Xin-jian², XU qing-shan³

(1. Institute for Water Resources, Yellow River Hydraulic Research Institute, Zhengzhou 450003, China; 2. School of Environment and Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 3. An ' yang Water Conservancy Bureau, An ' yang 455000, China)

Abstract :The basic procedure in regional water environment quality evaluation based on fuzzy nearness was analyzed. Taking Ningxia as an example, the application of fuzzy nearness in water environment evaluation was discussed. It is shown that the theory of regional water environment quality evaluation based on fuzzy nearness is easy to be understood and the computation method is simple. This method can make the extent of water environment pollution more clear. So it is a practical and accurate evaluation method.

Key words :water environment; nearness; membership function; environmental evaluation

水环境系统是一个受众多因素影响的开放系统。水环境质量评价是指通过对水体的一些物理、化学、生物指标的监测、调查,根据不同的目的和要求,依据一定的方法对水环境质量优劣程度作出的定量描述^[1]。纵观关于水环境质量评价方面的文献可知,水环境质量综合评价实际就是依据水污染物浓度的分级标准,判断某个地区某一时间内的水环境综合质量与哪级标准最接近,则它就被视为符合该级水环境质量。本文尝试采用一种新的评价模型——模糊贴近度模式,将其应用于宁夏回族自治区水环境质量的综合评价中,并对 Hamming 贴近度、Euclid 贴近度、最大最小贴近度、算术平均最小贴近度这 4 种模式的评价结果进行比照,从数学角度阐明各模式在水质评价中的可靠性、实用性。

1 基于模糊贴近度的水环境质量评价的基本步骤

1.1 单项指标隶属函数的建立

设每个采样点含有 m 个评价的单项因素(指标),每个因素(指标)分为 n 个不同等级,各等级 m 项因素(指标)标准限值矩阵表示为 A ,待评价的每个采样点各项实测指标值矩阵表示为 X 。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mp} \end{bmatrix}$$

取各评价因素的第一级(起始等级)或最末等级的标准限值为评价标准,建立各单项指标的隶属函

基金项目 :国家自然科学基金资助项目(E090350239090)

作者简介 :张文鸽(1975—),女,河南巩义人,工程师,从事水环境与水资源研究工作。E-mail :zhangwenge@yeah.net

数,其公式和图形如下所示:

a. 对于数值愈大污染愈重的指标(如酚、亚硝酸等),隶属函数采用降半正态分布,如图 1(a)所示。

$$\mu_{ij}(x) = \begin{cases} 1 & x_{ij} \leq a_{i1} \\ e^{-\beta(x_{ij}-a_{i1})^2} & x_{ij} > a_{i1} \end{cases}$$

($\beta > 0; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, p$) (1)

b. 对于数值愈大污染愈轻的指标(如溶解氧 DO 等),隶属函数采用升半正态分布,如图 1(b)所示。

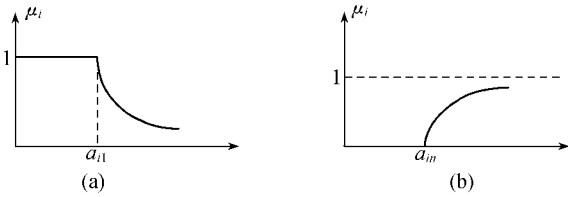


图 1 隶属函数 μ_i

$$\mu_{ij}(x) = \begin{cases} 0 & x_{ij} \leq a_{in} \\ 1 - e^{-\beta(x_{ij}-a_{in})^2} & x_{ij} > a_{in} \end{cases}$$

($\beta > 0; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, p$) (2)

式中: x_{ij} 为第 j 采样点评价指标 i 的实测值; a_{i1}, a_{in} 为评价指标 i 的起始和最末两个等级限值。

1.2 确定分项隶属度

由单项指标隶属函数公式分别计算出第 j ($j = 1, 2, \dots, p$) 采样点分项指标隶属度,记为

$$C = (C_1, C_2, \dots, C_p) \quad (3)$$

其中 $C_j = (c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{mj})^T$ ($j = 1, 2, \dots, p$)

k ($k = 1, 2, \dots, n$) 个等级标准作为特殊采样点计算其分项指标隶属度,记为

$$D = (D_1, D_2, \dots, D_n) \quad (4)$$

其中 $D_k = (d_{1k}, d_{2k}, \dots, d_{mk})^T$ ($k = 1, 2, \dots, n$)

1.3 确定各评价指标的权重

由于各采样点评价指标共有 m 个,每个指标的重要性可能相同,也可能不相同。因此,需要考虑评价指标权重 w_1, w_2, \dots, w_m ,其中 $w_i > 0, \sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。权重实质上是评价因子对采样点水质所作贡献大小的相对值。在同一评价指标下,各采样点的隶属度相差愈大,则反映该指标在综合评价中愈重要,指标传输给决策者的信息也愈多。因此,可以根据各指标传输给决策者信息量的大小来确定指标的权重。本文采用反映评价指标特征值之间差异性的参数——变异系数作为评价指标的权重^[2],其计算公式如下:

$$\bar{a}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_{ik} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

$$E_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (a_{ik} - \bar{a}_i)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

$$\delta_i = \frac{E_i}{a_i} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

$$w_i = \frac{\delta_i}{\sum_{i=1}^m \delta_i} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

1.4 计算模糊贴近度^[3]

a. Hamming 贴近度 σ_H

$$\sigma_H(C_j, D_k) = 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_i |c_{ij} - d_{ik}|$$

($j = 1, 2, \dots, p; k = 1, 2, \dots, n$) (9)

b. Euclid 贴近度 σ_E

$$\sigma_E(C_j, D_k) = 1 - \frac{1}{\sqrt{m}} \left[\sum_{i=1}^m w_i (c_{ij} - d_{ik})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

($j = 1, 2, \dots, p; k = 1, 2, \dots, n$) (10)

c. 最大最小贴近度 σ_1

$$\sigma_1(C_j, D_k) = \frac{\sum_{i=1}^m [(w_i c_{ij}) \wedge (w_i d_{ik})]}{\sum_{i=1}^m [(w_i c_{ij}) \vee (w_i d_{ik})]}$$

($j = 1, 2, \dots, p; k = 1, 2, \dots, n$) (11)

d. 算术平均最小贴近度 σ_2

$$\sigma_2(C_j, D_k) = \frac{2 \sum_{i=1}^m [(w_i c_{ij}) \wedge (w_i d_{ik})]}{\sum_{i=1}^m [(w_i c_{ij}) + (w_i d_{ik})]}$$

($j = 1, 2, \dots, p; k = 1, 2, \dots, n$) (12)

1.5 确定评价等级

若 $\sigma(C_j, D_{k_0}) = \max\{\sigma(C_j, D_k) | k = 1, 2, \dots, n\}$, 则判决第 j 采样点相对地属于 k_0 类,这就是最大隶属原则。

当 $\max\{\sigma(C_j, D_k) | k = 1, 2, \dots, n\} \ll 1$ 时,按最大隶属原则作判决时有时不太合理。实用上常把最大隶属原则与阈值原则联合起来使用。即若

$$\max\{\sigma(C_j, D_k) | k = 1, 2, \dots, n\} < \lambda \quad (13)$$

则拒识,若

$$\max\{\sigma(C_j, D_k) | k = 1, 2, \dots, n\} \geq \lambda \quad (14)$$

则按最大隶属原则判决。

2 模糊贴近度方法在水环境质量评价中的应用

现以宁夏回族自治区地表水水环境质量评价为例,阐明模糊贴近度方法与应用。宁夏 1996 年对以下 9 个采样点的 11 项污染指标进行了监测,各个采样点各项污染指标的实测值列于表 1。

表 1 1996 年宁夏地表水环境监测结果统计

采样点	$\rho(\text{DO}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{SS}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Hd}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{BOD}_5) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{FN}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Cr}^{+6}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{氟化物}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	大肠菌群 / (个·L ⁻¹)
黄河	6.98	3596.04	138.94	4.80	3.48	0.744	0.005	0.021	1.48	0.706	357.00
清水河	6.72	119.73	202.58	65.92	34.47	0.363	0.005	0.002	0	1.065	18425.00
茹河	7.69	786.52	220.85	3.06	1.37	0.224	0.001	0.012	0	1.042	20217.00
四二千沟	3.43	541.85	140.40	14.74	17.89	18.600	0.040	0.013	0.61	0.962	369.25
银新干沟	4.40	872.97	156.10	34.61	41.23	15.260	0.023	0.019	0.88	1.671	181.67
第三排水沟	4.20	273.09	261.07	20.60	9.84	8.418	0.059	0.021	0	1.702	0
第五排水沟	5.15	429.00	256.15	19.64	9.33	0.710	0.012	0.015	0	0.700	0
吴忠清水沟	2.17	7008.83	295.20	1032.00	123.96	4.648	0.458	0.211	0	0	0
灵武入黄口	4.38	3753.11	274.03	184.50	50.53	2.168	0.065	0.047	0	0	0

表 2 地面水环境质量标准

类别	$\rho(\text{DO}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{SS}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	总硬度 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{COD}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{BOD}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{FN}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Cr}^{6+}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{氟化物}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	大肠菌群 / (个·L ⁻¹)
I 类	8	30	120	2	2	0.4	0.001	0.01	0.02	0.6	0
II 类	6	40	150	4	3	0.5	0.002	0.02	0.05	0.8	10
III 类	5	70	180	6	4	0.6	0.005	0.03	0.10	1.0	100
IV 类	3	100	220	8	6	0.8	0.010	0.05	0.15	1.4	1000
V 类	2	150	250	10	10	1.0	0.100	0.10	0.20	1.5	10000

表 3 1996 年宁夏各采样点评价指标的权重(归一化后)

权重	溶解氧	悬浮物	总硬度	COD _{Mn}	BOD ₅	NH ₃ -N	FN	Cr ⁶⁺	TP	氟化物	大肠菌群
<i>w</i>	0.0577	0.0724	0.0329	0.0611	0.0733	0.0423	0.2105	0.0984	0.0814	0.0421	0.2279

2.1 标准选择与水质等级的划分

评价标准以 GB3838—2002《地面水环境质量标准》为主要依据,将水环境质量分为 5 类($k = \text{I}, \text{II}, \dots, \text{V}$)。对 GB3838—2002 中未列入的项目,根据有关文献建议和资料分析进行补充(如表 2 所示)。

2.2 隶属函数 μ_{ij} 的确定

隶属函数 μ_{ij} 的确定,参考公式(1)(2),可写出各单项污染指标的隶属函数。现以溶解氧(DO)和悬浮物(SS)为例:

$$\mu_{\text{DO}_j}(x) = \begin{cases} 0 & x_{\text{DO}_j} \leq 2 \\ 1 - e^{-(x_{\text{DO}_j}-2)^2} & x_{\text{DO}_j} > 2 \end{cases} \quad (15)$$

$(\beta = 1) (j = 1, 2, \dots, p)$

$$\mu_{\text{SS}_j}(x) = \begin{cases} 1 & x_{\text{BOD}_j} \leq 30 \\ e^{-(x_{\text{SS}_j}-30)^2} & x_{\text{BOD}_j} > 30 \end{cases} \quad (16)$$

$(\beta = 1) (j = 1, 2, \dots, p)$

2.3 各采样点评价指标权重的确定

由式(5)~(8)计算宁夏各采样点评价指标的权重如表 3 所示。

2.4 模糊贴近度的计算及各采样点水质评价

根据式(9)~(12)计算不同的贴近度,并取 $\lambda = 0.5$,得宁夏 1996 年地表水水环境质量评价结果如表 4 所示。

2.5 结果分析

对比各种贴近度评价模型的评价结果,前 3 个

表 4 不同贴近度评价模型评价结果

采样点	Hamming 贴近度	Euclid 贴近度	最大最小贴近度	算术平均最小贴近度
黄河	III 类	III 类	III 类	III 类
清水河	III 类	III 类	III 类	III 类
茹河	II 类	II 类	II 类	II 类
四二千沟	III 类	IV 类	III 类	III 类
银新干沟	III 类	IV 类	III 类	III 类
第三排水沟	III 类	III 类	I 类	I 类
第五排水沟	III 类	III 类	I 类	I 类
吴忠清水沟	V 类	V 类	I 类	I 类
灵武入黄口	III 类	III 类	I 类	I 类

采样点,即黄河、清水河、茹河的评价结果是完全相同的,且符合实际;对于四二千沟、银新干沟 2 个采样点,四种贴近度评价模型的评价结果中,Hamming 贴近度、最大最小贴近度、算术平均最小贴近度的评价结果一致, Euclid 贴近度的评价结果有较小的差别。经对表 1 中四二千沟、银新干沟 2 个采样点 11 项评价指标实测资料的具体分析,笔者认为, Hamming 贴近度、最大最小贴近度、算术平均最小贴近度的评价结果是符合实际的;对于后 4 个采样点, Hamming 贴近度、Euclid 贴近度的评价结果一致,而最大最小贴近度、算术平均最小贴近度的评价结果一致,但它们的评价结果相差较大,下面利用表 5 所列出的这 4 个采样点 11 项评价指标的实测资料对其水质进行具体分析。从表 5 可见,这 4 个采样点均有 8 项(或 8 项以上)评价指标的实测值全部超出

表 5 1996 年宁夏部分地表水环境监测结果统计

采样点	$\rho(\text{DO})$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{SS})$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{总硬度})$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{BOD}_5)$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{FN})$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Cr}^{+6})$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{TP})$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{氟化物})$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	大肠菌群/ ($\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$)
第三排水沟	4.20	273.09	261.07	20.60	9.84	8.418	0.059	0.021	0	1.702	0
第五排水沟	5.15	429.00	256.15	19.64	9.33	0.710	0.012	0.015	0	0.700	0
吴忠清水沟	2.17	7008.83	295.20	1032.00	123.96	4.648	0.458	0.211	0	0	0
灵武入黄口	4.38	3753.11	274.03	184.50	50.53	2.168	0.065	0.047	0	0	0
I 类标准限值	≥ 8	≤ 30	≤ 120	≤ 2	≤ 2	≤ 0.4	≤ 0.001	≤ 0.01	≤ 0.02	≤ 0.6	≤ 0

表 6 1996 年宁夏地表水水环境质量评价结果

采样点	黄河	清水河	茹河	四二干沟	银新干沟	第三排水沟	第五排水沟	吴忠清水沟	灵武入黄口
评价结果	Ⅲ类	Ⅲ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅲ类	Ⅲ类	Ⅲ类	V类	Ⅲ类

I 类水质标准限值。因此,最大最小贴近度、算术平均最小贴近度的评价结果是不符合实际的,应采取 Hamming 贴近度、Euclid 贴近度的评价结果。

综上所述,1996 年宁夏地表水水环境质量综合评价结果如表 6 所示。

3 结 语

根据地表水环境质量的模糊性特征,本文分析了模糊贴近度(本文采取 4 种模糊贴近度评价模型)用于区域水环境质量评价的基本步骤,并将其用于宁夏地表水环境质量的综合评价中,获得了较好的效果。基于模糊贴近度的区域水环境质量评价原理直观,计算方法简单、准确,评价结果精度较高,能较

完整地反映水环境质量污染程度,因此是一种实用而准确的评价方法。该模型不仅能对地表水环境质量进行评价,还可对地下水环境、大气环境、土壤环境进行评价,而且还可推广到其他领域的评价问题。

参考文献:

- [1] 程西方,谭炳卿.水环境质量评价及存在问题浅析[C]//汪斌.水环境保护与管理文集.郑州:黄河水利出版社,2002:373-376.
- [2] 时光新,姜运轩,陈学山.基于变异系数的地下水环境质量评价模型及应用[J].地下水,2002(3):147-148.
- [3] 汪培庄.模糊集合论及其应用[M].上海:上海科技出版社,1983:57-59.

(收稿日期 2005-02-23 编辑:高渭文)

(上接第 18 页)

等权情况下,所有的排污口权重均相同,即

$$\frac{W_1}{e^{Kx_1/u}} = \frac{W_2}{e^{Kx_2/u}} = \dots = \frac{W_n}{e^{Kx_n/u}} \quad (7)$$

$$m_i = 1/n \quad (8)$$

则基于权重系数的水环境容量为

$$W = \sum_{i=1}^n W_i m_i = \left(\sum_{i=1}^n e^{Kx_i/u} / n \right) \left[W_s - W_0 e^{-Kx_0/u} - \frac{W_0 u}{Kx_0} (1 - e^{-Kx_0/u}) \right]$$

等权情况下每个排污口对控制断面浓度的贡献率都相同,在此基础上的排污控制方案较为公平。

3.4 其他排污控制方案及其水环境容量

在排污口权重的基础上,可以综合考虑社会经济自然等各方面的因素来确定排污口的权重,以便于河流综合管理。

例如,如果每个排污口对应一个企业,在排污量和位置因素的基础上还可以再考虑工业产值、工业万元产值排污量等其他因素,在分配容量时适当向工业产值大、工业万元产值排污量少的企业倾斜,提高此类企业的权重系数,使排污方案更加科学。

4 结 语

本文考虑多个点源排污口、支流、取水口以及面源污染,建立了一维河流水环境容量综合模型。为使水环境容量计算简便科学易行,文中提出了排污口权重系数的概念,并在此基础上给出了基于排污口权重的水环境容量计算方法和相应的排污控制方案。该方法的正确性由恒权水环境容量计算实例得到了验证。基于排污口权重的水环境容量计算方法不但克服了传统的“试算法”计算繁琐、操作性较差的缺点,还可以为排污方案确定、河流综合管理提供新的思路。

参考文献:

- [1] 程声通.河流环境容量与允许排放量[J].水资源保护,2002(2):8-10.
- [2] 张永良,刘培哲.水环境容量综合手册[M].北京:清华大学出版社,1991:138-161.
- [3] 李如忠,钱家忠,汪家权.水污染物允许排放总量分配方法研究[J].水利学报,2002(5):112-115.

(收稿日期 2004-11-17 编辑:高渭文)