
综合
治理

基于模糊物元模型的区域水环境承载力研究

张会涓¹, 陈 然¹, 赵言文^{1 2}

(1. 南京农业大学 资源与环境学院, 江苏 南京 210095;

2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘 要: 在综合分析区域水环境特点的基础上选取了 7 项研究指标, 运用模糊物元模型与熵权法计算了烟台市牟平区 2005—2009 年各年水环境承载力与标准样本之间的贴近度, 揭示了区域水环境承载力的现状及变化趋势。研究结果表明, 烟台市牟平区 2005—2009 年水环境承载力与标准样本之间的贴近度分别为 0.675 9, 0.684 2, 0.666 7, 0.675 3 和 0.696 1。研究区域 2006 和 2009 年的水环境承载力达到等级 III 水平, 其余几年均在等级 III 水平以下, 说明研究区水环境承载力较差。并基于水环境承载力现状对区域资源与社会经济的可持续发展提出了相关建议。

关键词: 水环境承载力; 模糊物元模型; 熵权法; 权重

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)02-0186-04

中图分类号: X143

Regional Carrying Capacity of Water Environment Based on Fuzzy Matter-Element Model

ZHANG Hui-juan¹, CHEN Ran¹, ZHAO Yan-wen^{1 2}

(1. College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agriculture University,

Nanjing, Jiangsu 210095, China; 2. Hydrology and Water Resources and Water Conservancy

Engineering Science, National Key Laboratory, Hehai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In order to demonstrate the status and the trend of water environment carrying capacity, the fuzzy matter-element model coupled with entropy weight method was adapted to calculate the proximity between the water environment carrying capacity and standard samples in the area of Muping district, Yantai City from 2005 to 2009. A total of seven indices were selected. The results show that the proximity between the water environment carrying capacity and standard samples were 0.804 7, 0.684 2, 0.666 7, 0.675 3, and 0.696 1 from 2005 to 2009, respectively. The water environment carrying capacity were at level III in 2006 and 2009, while the other three years were under level III, indicating poor water environment carrying capacity of the investigated area. Furthermore, suggestions were made on improving the water environment carrying capacity and promoting the sustainable development of society and economy.

Keywords: water environment carrying capacity; fuzzy matter-element model; entropy method; weight

区域水环境承载能力是在一定区域、人口、水资源条件下, 结合一定的经济水平和社会生产条件, 水环境所能维持人口、经济、资源发展的支持能力, 所以区域水环境承载力描述的是一种水环境承受人类社会经济活动的的能力。影响区域水环境承载力的因素很多, 既有水环境质量方面的因素, 又与人口、经济、水资源密不可分^[1]。可以说区域水环境承载力在概念上是内涵明确, 外延模糊, 是一个涉及多指标的评

价问题。烟台市牟平区位于胶东半岛东北部, 拥有山、海、湖、河、泉、岛等自然资源, 具有独特的水环境特点。基于此, 本研究采用模糊物元模型, 结合熵权法确定各指标的权重, 对烟台市牟平区的水环境承载力现状及趋势进行分析。

1 研究区概况

烟台市牟平区位于胶东半岛东北部, 地理位置为

收稿日期: 2011-02-06

修回日期: 2011-04-06

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“农村发展中生态环境管理研究”(70833001)

作者简介: 张会涓(1986—), 女(汉族), 山西省忻州市人, 硕士研究生, 研究方向为生态规划、农业环评。E-mail: jsnjhuijuan@126.com。

通信作者: 赵言文(1963—), 男(汉族), 江苏省徐州市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为规划、环评、环境监测。E-mail: 2009103073@njau.edu.cn。

121°10′—121°55′E 和 37°04′—37°29′N ,与威海市高新区相邻,北濒黄海。区域总面积 1 511 km² 辖 2 个街道、10 个乡镇、共有 591 个行政村。根据牟平区水资源调查结果,该区 1956—2000 年多年平均水资源总量为 4.55 × 10⁸ m³,多年平均水资源可利用总量为 2.45 × 10⁸ m³。牟平区多年平均降雨量为 763.9 mm,境内流经大小河流 168 条,多年平均天然径流量为 3.60 × 10⁸ m³,陆上水面蒸发量在 1 000 ~ 1 100 mm 之间。

2 模型概述

2.1 模糊物元和复合模糊物元

给定事物的名称 N ,它关于特征 C 有量值为 v ,以有序三元组 $R = (N, C, v)$ 作为描述事物的基本元,简称物元。如果其中量值 v 具有模糊性,便称为模糊物元^[2],记作:

$$R = \begin{bmatrix} N \\ C \\ v \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: R ——模糊物元; N ——事物; C ——事物 N 的特征; v ——与事物特征 C 相应的模糊量值。

如果事物 N 有 n 个特征 C_1, C_2, \dots, C_n 相应的模糊量值 v_1, v_2, \dots, v_n 称为 n 维模糊物元。若以 R_{mn} 表示 n 个评价样本 m 维复合模糊物元,并以 M_j 表示第 j 个评价样本, C_i 表示第 i 项评价指标 相应的模糊量值为 $v_{ij} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ 记作:

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & \dots & N_n \\ C_1 & v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ C_2 & v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_m & v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 从优隶属度

模糊物元各单项指标相应的模糊值从属于标准方案各对应评价指标相应的模糊量值隶属程度 称为从优隶属度。由于各评价指标特征值对于方案评价来说有的是越大越优,有的是越小越优,因此,对于不同的隶属度分别采用不同的计算公式,计算隶属度的公式有很多,为了更充分地反映水环境承载力评价各指标的相对性,采用形式为:

$$\text{越大越优型: } \mu_{ij} = v_{ij} / \max v_{ij} \quad (3)$$

$$\text{越小越优型: } \mu_{ij} = \min v_{ij} / v_{ij} \quad (4)$$

式中: μ_{ij} ——从优隶属度; $\max v_{ij}, \min v_{ij}$ ——各方案中每一评价指标中的最大值和最小值。

2.3 标准模糊物元与差平方复合模糊物元

标准模糊物元 R_0 是指从优隶属度模糊物元中各

评价指标的从优隶属度的最大值或最小值。本研究以最大值作为最优,也就是各指标从优隶属度均为 1。

若以 $\Delta_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 表示标准模糊物元与复合从优隶属度模糊物元中各项差的平方,则组成差平方复合模糊物元 $\Delta_{ij} = (v_{0i} - v_{ij})^2$,可表示为:

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & \dots & N_n \\ C_1 & \Delta_{11} & \Delta_{12} & \dots & \Delta_{1n} \\ C_2 & \Delta_{21} & \Delta_{22} & \dots & \Delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_m & \Delta_{m1} & \Delta_{m2} & \dots & \Delta_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.4 熵值法确定评价指标权重

水环境承载力的各个评价指标的重要程度是不相同的,常用权重来衡量。在确定评价指标的权重时,国内外学者已经提出了多种计算权重的方法,如德尔菲法、AHP 方法、熵值法、主成分分析法、因子分析法、复相关系数法等^[3],在信息论中,熵值反映了信息无序化程度,其值越小,系统无序度越小,故可用信息熵评价所获系统信息的有序度及其效用,即由评价指标值构成的判断矩阵来确定指标权重,它能尽量消除各指标权重计算的人为干扰,使评价结果更符合实际,具备一定的科学性。其计算步骤为:

(1) 构建 m 个评价指标 n 个事物的判断矩阵

$$R_{mn} = [v_{ij}] \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$$

(2) 将判断矩阵归一化处理。得到归一化判断矩阵 B 。对大者为优的指标有:

$$B_{ij} = (v_{ij} - v_{\min}) / (v_{\max} - v_{\min}) \quad (6)$$

对小者为优的指标有:

$$B_{ij} = (v_{\max} - v_{ij}) / (v_{\max} - v_{\min}) \quad (7)$$

式中: v_{\max}, v_{\min} ——分别为同指标下不同事物中最满意者或最不满意者(越小越满意或越大越满意)。

(3) 定义熵。根据熵的定义, m 个评价指标 n 个评价事物可以确定评价指标的熵为

$$H_i = \frac{1}{\ln n} \left(\sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right) \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

$$f_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{j=1}^m b_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

式中: b_{ij} ——归一化判断矩阵 B 中的元素。

当 $f_{ij} = 0$ 时 $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$; 当 $f_{ij} = 1$ 时 $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$,这显然与熵所反映的信息无序化程度相悖,根据水环境承载力评价的实际意义,将其加以修正,即为:

$$f_{ij} = \frac{1 + b_{ij}}{\sum_{j=1}^m (1 + b_{ij})} \quad (10)$$

(4) 定义熵权。定义了第 i 个评价指标的熵之后,可得到第 i 个评价指标的熵权定义,即:

$$\omega_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i} \quad (0 \leq \omega_i \leq 1, \sum_{i=1}^n \omega_i = 1) \quad (11)$$

2.5 贴近度及综合评价

贴近度是指被评价样品与标准样品两者互相接近的程度,其值越大表示两者越接近。计算贴近度的公式有很多。考虑到本研究的具体评价意义,采用欧氏贴近度,即

$$\rho_i = 1 - \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega \Delta_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

由于欧氏贴近度是表示各评价样本与标准样本(最优样本)之间的贴近程度,根据贴近度值即可对评价样本进行优劣排序及综合分析。

3 研究区水环境承载力的熵权模糊物元分析

3.1 评价指标的选取及评价等级的划分

3.1.1 评价指标的选取 在水环境承载力评价中,一个重要的环节就是选择适当的评价指标。指标的

选取原则为实用、易于量化、反映系统本质。根据全国水资源供需分析中的指标体系并结合烟台市牟平区实际情况,选取 7 项研究指标,包括用水量占水资源量的比重(W_1)、工业用水重复利用率(W_2)、农业灌溉用水有效利用系数(W_3)、水污染治理投资占 GDP 的比重(W_4)、工业废水排放达标率(W_5)、万元产值耗水量(W_6)和万元产值污染物排放强度(W_7)。

3.1.2 评价等级的划分 为了更直观地对水环境承载力进行评价与表达,将水环境承载力划分为 4 个等级^[4]: (1) 等级 I。水环境承载力强,水环境与经济社会发展处于良好的协调发展状态,可以适当增大经济发展的力度,同时注意环境保护; (2) 等级 II。水环境承载力较强,水环境与经济社会发展处于较协调的发展状态,应加强水环境保护力度,否则,将破坏人类活动与水环境的协调; (3) 等级 III。水环境承载力较弱,水环境与经济社会发展处于非协调发展状态,必须加大环保投资及水环境治理工作的力度; (4) 等级 IV。水环境承载力弱,水环境与经济社会发展处于严重非协调发展状态,生态系统严重失衡,有可能引发水环境危机。最后,参考《国家环保局城市环境综合整治定量考核目标》确定各项评价指标的分级值(表 1)。

表 1 水环境承载力评价指标和评价等级

评价指标	等级 I	等级 II	等级 III	等级 IV
用水量占水资源量的比重 W_1	0.07 ~ 0.08	0.08 ~ 0.09	0.09 ~ 0.10	0.10 ~ 0.11
工业用水重复利用率 W_2	1.00 ~ 0.9	0.90 ~ 0.80	0.80 ~ 0.70	0.70 ~ 0.60
农业灌溉用水有效利用系数 W_3	0.60 ~ 0.56	0.56 ~ 0.52	0.52 ~ 0.48	0.48 ~ 0.44
水污染治理投资占 GDP 的比重 W_4	0.001 6 ~ 0.001 4	0.001 4 ~ 0.001 2	0.001 2 ~ 0.000 1	0.001 0 ~ 0.000 8
工业废水排放达标率 W_5	1.00 ~ 0.98	0.98 ~ 0.96	0.96 ~ 0.94	0.94 ~ 0.92
万元产值排水量 W_6 (t/万元)	6 ~ 8	8 ~ 10	10 ~ 12	12 ~ 14
万元产值污染物排放强度 W_7 (kg/万元)	2.00 ~ 2.50	2.50 ~ 3.00	3.00 ~ 3.50	3.50 ~ 4.00

3.2 计算水环境承载力欧氏贴近度

(1) 选取 2005—2009 年 7 项指标的特征值,建立烟台市牟平区水环境承载力识别指标特征值矩阵 R_{75} :

$$R_{75} = \begin{bmatrix} & 2005 & 2006 & 2007 & 2008 & 2009 \\ W_1 & 0.106 4 & 0.099 2 & 0.091 5 & 0.091 0 & 0.089 6 \\ W_2 & 0.742 5 & 0.785 9 & 0.793 1 & 0.813 3 & 0.799 6 \\ W_3 & 0.510 0 & 0.520 0 & 0.480 0 & 0.520 0 & 0.500 0 \\ W_4 & 0.001 1 & 0.000 8 & 0.000 7 & 0.000 6 & 0.000 7 \\ W_5 & 0.986 6 & 0.995 4 & 0.996 6 & 0.998 5 & 1.000 0 \\ W_6 & 10.420 0 & 9.040 0 & 10.560 0 & 9.540 0 & 9.010 0 \\ W_7 & 4.160 0 & 3.600 0 & 3.240 0 & 3.010 0 & 2.990 0 \end{bmatrix}$$

(2) 计算从优隶属度。按照公式(3—4)计算各指标特征值的从优隶属度,其中用水量占水资源量的

比重(W_1)、万元产值排水量(W_6)、万元产值污染物排放强度(W_7)为越小越优指标,其余为越大越优指标。

$$R_{75} = \begin{bmatrix} & 2005 & 2006 & 2007 & 2008 & 2009 \\ W_1 & 0.657 9 & 0.705 6 & 0.765 0 & 0.769 2 & 0.781 3 \\ W_2 & 0.742 5 & 0.785 9 & 0.793 1 & 0.813 3 & 0.799 6 \\ W_3 & 0.850 0 & 0.866 7 & 0.800 0 & 0.866 7 & 0.833 3 \\ W_4 & 0.687 5 & 0.500 0 & 0.437 5 & 0.375 0 & 0.437 5 \\ W_5 & 0.986 6 & 0.995 4 & 0.996 6 & 0.993 2 & 1.000 0 \\ W_6 & 0.575 8 & 0.663 7 & 0.568 2 & 0.628 9 & 0.665 9 \\ W_7 & 0.480 8 & 0.555 6 & 0.617 3 & 0.664 5 & 0.668 9 \end{bmatrix}$$

(3) 建立标准模糊物元和差平方复合模糊物元。

构造标准样本模糊物元,其中各项由 R_{75} 中各评价样本从优隶属度最大值组成,也就是各指标从优隶属度均为 1。计算得到差平方复合模糊物元 R_{Δ} 。

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} & 2005 & 2006 & 2007 & 2008 & 2009 \\ W_1 & 0.117 0 & 0.086 6 & 0.055 2 & 0.053 3 & 0.047 9 \\ W_2 & 0.066 3 & 0.045 8 & 0.042 8 & 0.034 9 & 0.040 2 \\ W_3 & 0.022 5 & 0.017 8 & 0.040 0 & 0.017 8 & 0.027 8 \\ W_4 & 0.097 7 & 0.250 0 & 0.316 4 & 0.390 6 & 0.316 4 \\ W_5 & 0.000 2 & 0.000 0 & 0.000 0 & 0.000 0 & 0.000 0 \\ W_6 & 0.179 9 & 0.113 1 & 0.186 5 & 0.137 7 & 0.111 6 \\ W_7 & 0.269 6 & 0.197 5 & 0.146 5 & 0.112 6 & 0.109 6 \end{bmatrix}$$

(4) 熵值法确定权重系数。首先构建 7 个评价指标 5 个事物的判断矩阵 R_{75} ,并将判断矩阵 R_{75} 归一化处理,得到归一化判断矩阵 B

$$B = \begin{bmatrix} 1.000 0 & 0.571 4 & 0.113 1 & 0.083 3 & 0.000 0 \\ 0.000 0 & 0.613 0 & 0.714 7 & 1.000 0 & 0.806 5 \\ 0.750 0 & 1.000 0 & 0.000 0 & 1.000 0 & 0.500 0 \\ 1.000 0 & 0.400 0 & 0.200 0 & 0.000 0 & 0.200 0 \\ 0.000 0 & 0.656 7 & 0.746 3 & 0.888 1 & 1.000 0 \\ 0.909 7 & 0.019 4 & 1.000 0 & 0.341 9 & 0.000 0 \\ 1.000 0 & 0.521 4 & 0.213 7 & 0.017 1 & 0.000 0 \end{bmatrix}$$

按照公式(8—11)分别计算评价指标的熵 H_j 和熵权 W

$$H_j = (0.801 4 \ 0.938 2 \ 0.998 8 \ 0.810 6, \\ 0.949 7 \ 0.824 0 \ 0.786 2)^T \\ W = (0.137 4 \ 0.147 9 \ 0.152 5 \ 0.138 1, \\ 0.148 7 \ 0.139 1 \ 0.136 3)^T$$

(5) 计算欧氏贴进度。按照公式(12)计算 2005—2009 年烟台市牟平区水环境承载力状况与标准样本之间的贴进度。

$$R_{\rho H} = \begin{pmatrix} \text{年份} & 2005 & 2006 & 2007 & 2008 & 2009 \\ \rho H_i & 0.675 9 & 0.684 2 & 0.666 7 & 0.675 3 & 0.696 1 \end{pmatrix}$$

(6) 计算评价等级的欧氏贴进度。选择各评价指标等级 I, II, III, IV 的平均值组成评价等级特征值矩阵,按照上述步骤计算等级 I, II, III, IV 与标准样本之间的贴进度,结果表明,等级 I, II, III, IV 与标准样本之间的贴进度分别为 0.920 0, 0.798 2, 0.685 4, 0.623 6。

4 结果分析

本研究基于模糊物元模型,应用熵值法确定权重系数并计算各评价目标年的水环境承载力与标准样本之间的贴进度,结果表明,等级 I, II, III, IV 与标准样本之间的贴进度分别为 0.920 0, 0.798 2, 0.685 4 和 0.623 6,烟台市牟平区 2005—2009 年水环境承载力与标准样本之间的贴进度分别为 0.675 9, 0.684

2, 0.666 7, 0.675 3, 0.696 1。研究区只有 2006 和 2009 年的水环境承载力达等级 III 水平,其余几年均在等级 III 水平以下,研究区水环境承载力状况较差,但 2007, 2008 和 2009 年牟平区的水环境承载力整体呈上升趋势。

针对烟台市牟平区水环境承载力较差的状况,并结合该区水资源与社会经济发展的实际情况,提出几点建议仅供相关部门参考和讨论:(1) 加强水源保护,着重加强重要生态功能保护区如乳山河、磨山河、中村河的水源保护,并且扩大该区域沁水河、鱼鸟河上游已有的水源保护区段;(2) 建立分质供水体系,鼓励生产单位使用地表水和回用水,战略储备地下水;(3) 加大污水治理力度和工业节水技术改造,提高水资源利用率,培育节水型企业和工业废水“零”排放企业。

[参 考 文 献]

- [1] 王俭,孙铁珩,李培军,等. 基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型及其应用[J]. 生态学杂志, 2007, 26(1): 139-144.
- [2] 徐越,刘玲. 基于可持续发展的区域水环境承载力研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [3] 陈林,许其功,李铁松,等. 模糊物元识别模型在巢湖水体富营养化评价中的应用研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(4): 729-736.
- [4] 王俭,孙铁珩,李培军,等. 基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型及其应用[J]. 生态学杂志, 2007, 26(1): 139-144.
- [5] 赵晓梅,盖美. 基于熵权模糊物元的辽宁省生态环境承载力研究[J]. 环境科学与管理, 2010, 36(6): 144-149.
- [6] 席北斗,于会彬,郭旭晶,等. 基于模糊物元理论的地下水水质评价模型构建及应用[J]. 环境工程学报, 2009, 3(2): 381-384.
- [7] 姚玉鑫,张英,鲁斌礼,等. 模糊物元模型在评价区域水环境承载力中的应用[J]. 南京师范大学学报, 2007, 7(2): 82-86.
- [8] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 北京科学技术文献出版社, 1994.
- [9] 任善强,雷鸣. 数学模型[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1998.
- [10] 来雪慧,王小文,徐杰峰,等. 基于向量模法的陕南地区水环境承载力评价[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 56-60.
- [11] 房睿,谢海燕,王纯利. 玛纳斯河流域水环境承载力评价指标体系研究[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(8): 841-844.