

渔业水域水质模糊综合评价模型研究

王瑞梅^{1,2} 傅泽田³ 何有缘¹ 彭飞⁴ 陈大庆^{2,5}

- (1. 中国农业大学 经济管理学院, 北京 100083; 2. 中国水产科学研究院 淡水生态与健康养殖重点开放实验室, 中国水产科学研究院长江水产研究所, 湖北 荆州 434000; 3. 中国农业大学 工学院, 北京 100083; 4. 吉林省农业机械管理总站, 长春 130061; 5. 中国水产科学研究院 淡水渔业研究中心, 江苏 无锡 214081)

摘要 为了分析淡水养殖渔业水质的评价问题,采用专家问卷调查法、德尔斐法和模糊数学方法,研究了渔业水质评价指标体系和评价标准的确定、评价模型的建立及评价模型的检验;提出了渔业水质模糊综合评价模型。大量实验结果表明,该模糊综合评价模型对渔业水质的综合评价符合渔业水质的实际情况,评价结果客观、合理。

关键词 渔业水质; 模糊综合评价; 指标体系

中图分类号 S 931.3

文章编号 1007-4333(2005)06-0051-05

文献标识码 A

Research on fuzzy synthetical evaluation model of aquaculture water quality

Wang Ruimei^{1,2}, Fu Zetian³, He Youyuan¹, Peng Fei⁴, Chen Daqing^{2,5}

- (1. College of Economics and Management, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Freshwater Zoology and Health Breed Aquatics, Chinese Academy of Fishery Sciences, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Jingzhou 434000, Hubei, China; 3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 4. Jilin Agriculture Machinery Management Master Station, Changchun 130061, China; 5. Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, Jiangsu, China)

Abstract Aquaculture Water Quality Evaluation is a comprehensive multiple objective evaluation in terms of aquaculture water quality, which is the important part for aquaculture water quality management. In order to analyze the evaluation method of aquaculture water quality, the paper used expert's questionnaire, Delphi and fuzzy mathematics, establishing water quality evaluation index and criteria. Aquaculture water quality evaluation fuzzy synthetically evaluation model is put forward too, which makes the results more objective and more reasonable from vast experimental result.

Key words aquaculture; fuzzy synthetically evaluation model; index

渔业水域水质是制约渔业产品产量和质量的关键因素,也是渔业灾害的根源所在。由于缺乏科学合理的评价方法和手段,目前我国在渔业水域水质评价方面的研究还处于经验和半经验状态,制约了渔业的高产、优质、高效和可持续发展。为解决上述问题,笔者结合模糊评判理论、专家问卷调查方法,建立了渔业水质评价指标体系、评价标准、渔业水质模糊综合评价模型,对上述问题进行分析。

1 渔业水质评价指标体系的建立

渔业水质评价指标体系的建立要遵循目的性、整体性、适用性、科学性、可操作性、评价指标可量化原则^[1-3],因素模糊子集确定得恰当与否,直接影响综合评判的结果。因素重要程度的确定方法有德尔斐法、专家调查法和判断矩阵分析法^[4],本研究选用德尔斐(Delphi)法确定因素的重要程度^[5],进而

收稿日期: 2005-05-31

基金项目: 中国水产科学研究院淡水生态与健康养殖重点开放实验室开放基金(FEA20040101);中国农业大学经济管理学院青年科学基金(CEM04003)

作者简介: 王瑞梅,讲师,博士,主要从事管理信息系统、资源环境评价的研究;陈大庆,通讯作者, Tel:0716-8212277-3046, E-mail: chdq@yfi1.ac1.cn

确定评价指标体系。

设渔业水质的评价从下列 m 个因素中选取适当的因素进行评价,着眼因素集为

$$U = \{ u_1, u_2, \dots, u_m \} \quad (1)$$

U 的因素重要程度模糊子集为

$$A = \{ a_1, a_2, \dots, a_m \} \quad (2)$$

采用德尔斐法确定因素重要程度系数 a_i ($i = 1, 2, \dots, m$), 因素重要性由专家评分。要求专家不但要有渊博的专业知识,而且要熟悉和掌握所研究问题的全部具体情况。

1) 影响渔业水质各因素 u_i 重要性序列值的确定。参加评价的专家们凭经验和见解,划定各因素 u_i 的重要性序列值 $F_i, F_i \in \{1, 2, \dots, m\}$ 。最重要的因素,其 F_i 值为 1; 最次要的因素,其 F_i 值为 m 。将第 k 个专家就因素 u_i 所给定的因素重要性序列值,记为 F_{i-k} 。每位专家提供 1 份各因素 u_i 的 F_i 值评定表。

2) 各因素优先得分的获得。按专家们所提供的因素重要性序列值 F_i 进行统计。当 $\frac{F_{i-k}}{F_i-k} = 1$ 时,记 $A_{ij-k} = 1$, 当 $\frac{F_{i-k}}{F_i-k} > 1$ 时,记 $A_{ij-k} = 0$ 。设参加评议的专家共有 n 位。将所有参加评议专家 A_{ij-k} 的值累加起来,即得因素的优先得分

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n A_{ij-k} \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

3) 各因素重要程度值。将 A_{ij} 值累加起来,得

$$A_i = \sum_{j=1}^m A_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

其中 A_i 表示第 i 行的 A_{ij} 的累加值,令

$$A_{\max} = \max \{ A_1, A_2, \dots, A_m \} \quad (5)$$

$$A_{\min} = \min \{ A_1, A_2, \dots, A_m \} \quad (6)$$

显然,与 A_{\min} 相对应的因素的重要程度最高,而与 A_{\max} 相对应因素的重要程度与其他诸因素相比最低。

4) 各因素间重要程度级差 d 。令 $a_{\max} = 1, a_{\min} = 0.1, a_{\max}$ 和 a_{\min} 可在 $[0, 1]$ 中任意取定,则

$$d = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \quad (7)$$

5) 渔业水质各因素重要程度系数 a_i 。由

$$a_i = \frac{A_i - A_{\min}}{d} + 0.1 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

得出所要确定因素重要程度模糊子集

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_m) \quad (9)$$

2 渔业水质评价标准的确定

2.1 渔业水质等级的确定

对于多数指标,浓度过高或过低都会影响鱼类的生存,造成其发生疾病甚至死亡。鱼类在生理上对这些指标的适应性和耐受程度遵循正态分布规律。对一些指标,其值或者越小越好或者越大越好,这样可以看出是正态分布的左半部分或右半部分。遵照这一原则,参考专家意见,可对渔业水质进行分级。本研究根据鱼类对监测指标的耐受程度,将渔业水质分为 5 级(表 1)。

表 1 渔业水质模糊分级

Table 1 Table of fuzzy classification for the pond water quality

| 分级 | 描述 |
|----|--|
| 优 | 各指标在鱼类的最佳生存区范围内 |
| 良 | 某些指标接近或达到鱼类最佳生存区的上下限 |
| 中 | 某些指标接近或达到了鱼类生理耐受区的上下限,如果环境继续恶化,鱼类将发生病变或死亡 |
| 差 | 有些指标达到或超过鱼类生理耐受区的上下限,已经发现鱼类的不适宜反应;如果环境继续恶化,会有大量鱼死亡 |
| 极差 | 大多数指标超过鱼类生理耐受区的上下限,鱼类生存非常困难 |

根据渔业水质模糊分级思想,通过专家调查问卷,确定评价标准。

2.2 渔业水质评价指标的区间划分

1) 评价数据的分布。对某一因素对应的指标值的范围按从小到大分成几段,给出参与评价专家数占专家总人数的百分数(图 1 中左侧柱图),再考虑专家的权威程度,对评价标准值进行择优。

2) 评价标准值的择优确定。专家的权威程度是指专家对该因素对水质影响的熟悉程度,将获得的每一评价值乘以专家的权威系数^[6],即得到考虑专家权威程度的评价标准值(图 1 右侧柱图)。

由图 1 可以看出同一因素在同一级别专家评价的分布比例,按照比例的最大值确定该因素在该级别的评价标准值。

3 渔业水质评价模型的建立

水质的好与坏具有模糊性,因此渔业水质评判

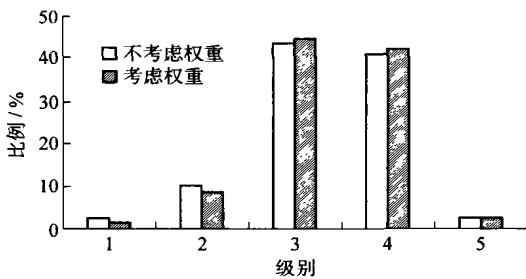


图 1 某一级别某一因素专家评价分布比例

Fig. 1 Condition of one factor was evaluated by the expert
 的基本任务是确定样本集 X 中的样本 x_j 对于模糊子集 A 的隶属度。

设采用 n 个因素(或指标)描述水质,因素集为 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$;所有可能出现的评语有 m 个,评语集为 $A = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_m)$ 。

3.1 水质评价指标的量化处理

指标的量化主要采用分区间法确定:

$$Q = \begin{cases} y_1 & M_1 & x_i < M_2 \\ y_2 & M_2 & x_i < M_3 \\ y_3 & M_3 & x_i < M_4 \\ y_4 & x_i & M_4 \end{cases} \quad (10)$$

式中: Q 为第 i 个指标某一级的确定值; y_i 为某一变化区间内的数值; x_i 为采集的数据值; $M_1 \sim M_4$ 为各区间变化的临界值^[7-8]。采用取中值办法对评价标准值进行量化。

3.2 渔业水质分级评价指标综合权重矩阵

根据水质标准和当地专家经验,将水质分为 c 级, m 个评价指标,从 n 个渔业或测点中采集水样;每个样本有 m 项水质分级评价指标的实测值,水质优劣程度的分级数为 c ,评价指标的标准浓度值为 Y ,则有 c 级水质标准浓度矩阵 $Y_{c \times m}$ 和渔业水质实测浓度矩阵 $X_{m \times n}$ 。

在此模式识别中,根据实测样本值确定评价指标的标准值。

$$Y_{c \times m} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{c1} & y_{c2} & \dots & y_{cm} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$X_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

将指标分递减和递增型 2 类:1)从 1 级至 c 级,指标标准值减小;2)从 1 级至 c 级,指标标准值增加。从淡水养殖的要求来看属于 2 种类型的混合,即因素的标准值既不是越高越好,也不是越低越好,并且多数评价指标的标准都是 2 种类型的有机结合。

渔业水质的优劣可用模糊集中的隶属度来描述。本文中规定:1 级水的水质标准浓度在模糊矩阵中的对应元素为 1, c 级水的对应元素为 0,在 1 与 c 之间的水质标准浓度所对应的元素在 $(0, 1)$ 之间。对于第 1)类指标,令不大于指标 c 级标准值的相对隶属度为 0(左极点);令不小于指标 1 级标准值的相对隶属度为 1(右极点)。指标标准值介于 1 级与 c 级标准值之间的相对隶属度按线性变化确定^[9-12]。第 1)类指标的相对隶属度为

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \geq y_{ic} \\ \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{ic} - y_{i1}} & y_{ic} < x_{ij} < y_{i1} \\ 1 & x_{ij} \leq y_{i1} \end{cases} \quad (13)$$

h 级指标标准值的相对隶属度为

$$s_{ih} = \begin{cases} 0 & y_{ih} = y_{ic} \\ \frac{y_{ih} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} & y_{ic} < y_{ih} < y_{i1} \\ 1 & y_{ih} = y_{i1} \end{cases} \quad (14)$$

同理,得第 2)类指标的相对隶属度和 h 级指标标准值的相对隶属度

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \leq y_{ic} \\ \frac{y_{ic} - x_{ij}}{y_{ic} - y_{i1}} & y_{i1} < x_{ij} < y_{ic} \\ 1 & x_{ij} \geq y_{i1} \end{cases} \quad (15)$$

$$s_{ih} = \begin{cases} 0 & y_{ih} = y_{ic} \\ \frac{y_{ic} - y_{ih}}{y_{ic} - y_{i1}} & y_{i1} < y_{ih} < y_{ic} \\ 1 & y_{ih} = y_{i1} \end{cases} \quad (16)$$

式中: y_{i1} 、 y_{ih} 、 y_{ic} 分别为 1 级、 h 级、 c 级水质评价指标的标准浓度; r_{ij} 为样本 j 指标 i 浓度的相对隶属度; s_{ih} 为级别 h 指标 i 的标准浓度值。

由式(13)可将式(11)转换为渔业水质评价标准的模糊矩阵 $S_{m \times c}$ 。同理可将水质评价指标实测浓度变换为实测浓度的模糊矩阵 $r_{m \times n}$ 。

$r_{m \times n}$ 描述了个样本全部指标对于模糊子集的隶属度,根据模糊集合论可将隶属度定义为权重的

论点,取水质评价的实测浓度模糊矩阵 $r_{m \times n}$ 作为样本集在不同指标浓度下的权重矩阵。再考虑评价指标对水质的不同影响,给定 m 项评价指标本身对水质分级作用大小的权重 $v = (v_1, v_2, \dots, v_m)$ $\left(\sum_{i=1}^m v_i = 1 \right)$ 。综合考虑上述 2 项权重,得到 n 个样本的 m 项评价指标的综合权重矩阵

$$A_{m \times n} = v \times R_{m \times n} \quad (17)$$

将矩阵 $A_{m \times n}$ 元素值按列归一化,得 $W_{m \times n}$ 矩阵为样本的综合权重矩阵。

3.3 渔业水质评价模糊模式识别

第 m 项指标的综合权重矩阵用向量表示

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_m)^T \quad (18)$$

第 h 级水质标准式(16)用向量表示

$$s_h = (s_{1h}, s_{2h}, \dots, s_{mh})^T \quad (19)$$

第 j 个水体样本式(13)用向量表示

$$r_j = (r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{mj})^T \quad (20)$$

于是第 j 个样本与第 h 级水质标准间差异可用考虑权重 W_i 的广义距离来表示

$$W |s_h - r_j| = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^5 (W_i |s_{ih} - r_{ij}|)^p} \quad (21)$$

式中 p 为距离参数。

根据渔业水质分级的模糊性,样本以不同的隶属度(贴近度) U 隶属于各级水质标准,用模糊矩阵 $U_{m \times n}$ 表示各样本对 c 级水质的隶属度(贴近度),其约束条件为

$$\sum_{h=1}^m u_{hi} - 1 = 0 \quad \sum_{j=1}^n u_{hj} > 0 \quad (22)$$

加权广义距离

$$d[s_h, r_j] = u_{hj} \sqrt[p]{\sum_{i=1}^5 (W_i |s_{ih} - r_{ij}|)^p} \quad (23)$$

表示第 j 个样本与第 h 级水质标准的差异。用最小二乘法建立目标函数

$$\min \{ F(u_{ij}) \} = \min_{j=1}^n \left\{ \sum_{h=1}^5 u_{hj}^2 \left[\sum_{i=1}^5 [W_{ij} |r_{ij} - s_{ih}|]^p \right]^{2/p} \right\} \quad (24)$$

构造拉格朗日函数,分别对拉格朗日乘数 λ 和 u_{hj} 求函数 $L(u_{hj}, \lambda)$ 的偏导数,并令其等于 0,可解出最优分级矩阵元素的表达式

$$u_{hj} = \frac{1}{\sum_{i=1}^5 [W_{ij} (r_{ij} - s_{ih})]^2 + \sum_{k=1}^{k-1} \sum_{i=1}^5 [W_{ij} (r_{ij} - s_{ik})]^2} \quad (25)$$

据此可以计算出最优分级矩阵的每一个元素,从而得到样本集对于各分级的隶属度,对渔业水质做出合理的评价。

4 实证分析

选择天津市精武集团淡水养殖场,对所提出的评价指标体系、评价标准及评价模型进行检验。

1) 评价指标体系的形成。根据专家问卷,用德尔斐法得到精武集团淡水养殖场渔业水质评价因素重要程度模糊子集为: $A = (1.004, 0.866, 0.812, 0.691, 0.740, 0.333, 0.239, 0.737, 0.248, 0.454, 0.449)$ 。根据调查问卷的排序结果,结合当地专家建议,取重要程度大的 5 个因素作为评价指标。分别为:溶解氧, pH, 浮游植物量, 透明度和氮含量。

2) 评价指标评价标准的计算。精武集团淡水养殖场渔业水质评价标准值见表 2。

3) 实证评价。对 2002-07-03—2005-07-05 监测的数据(表 3)进行评价,与实际情况进行比较、分析。用模糊综合评价法评价水质,评价结果为:

| 水池号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 等级 |
|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| $u =$ | 0.233 | 0.390 | 0.218 | 0.473 | 1 |
| | 0.530 | 0.438 | 0.584 | 0.350 | 2 |
| | 0.153 | 0.109 | 0.130 | 0.095 | 3 |
| | 0.050 | 0.038 | 0.042 | 0.048 | 4 |
| | 0.336 | 0.034 | 0.026 | 0.034 | 5 |
| 水池号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 等级 |
| $u =$ | 0.041 | 0.018 | 0.019 | 0.20 | 1 |
| | 0.250 | 0.097 | 0.185 | 0.109 | 2 |
| | 0.390 | 0.410 | 0.505 | 0.486 | 3 |
| | 0.230 | 0.377 | 0.207 | 0.261 | 4 |
| | 0.090 | 0.098 | 0.083 | 0.123 | 5 |

其中 u 表示水质指标浓度值相对于每一等级标准浓度的隶属度,由最大隶属度判别原则可知,7月3日水质较好,1、2、3号池塘均为 2 级,4 号为 1 级,鱼类生存较好,而 7 月 15 日 4 个池塘的水质均较 7 月 3 日恶化,全为 3 级,即水质中的某些指标接近或达

表 2 评价指标处于各等级标准值的范围

Table 2 The scope of standard value of the index system

| 评价指标 | 优 | 良 | 中 | 差 | 极差 |
|-------------------|-----------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|
| pH | (7.5,8.5] | (6.5,7.5] 或 (8.5,9.0] | (6.0,6.5] 或 (9.0,9.5] | (5.5,6.0] 或 (9.5,12] | [0,5.5] 或 (12,14] |
| 透明度/cm | (25,40] | (15,25] 或 (40,60] | (10,15] 或 (60,80] | (5,10] 或 (80,100] | (0,5] 或 (100,+] |
| 总氮质量浓度 / (mg/L) | (1.5,2.5] | (2.5,4.0] | (4.0,7.0] | (7.0,10] | (10,+] |
| 溶解氧质量浓度 / (mg/L) | (4.0,6.0] | (3.0,4.0] | (2.0,3.0] | (0,2] | (0,2] |
| 浮游植物质量浓度 / (mg/L) | (35,60] | (20,35] 或 (60,90] | (15,20] 或 (90,120] | (5,15] 或 (120,150] | (0,5] 或 (150,+] |

表 3 天津市精武集团养殖场一队 1~4 号池水质监测数据 (2002 年)

Table 3 Inspected data of the pond water quality (in 2002)

| 日期 | 水池号 | 透明度/cm | pH | 总氮质量 浓度 / (mg/L) | 溶解氧质量 浓度 / (mg/L) | 浮游植物质量 浓度 / (mg/L) |
|-------|-----|--------|------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 07-03 | 1 | 14 | 8.60 | 2.10 | 8.47 | 73.85 |
| 07-15 | 1 | 12 | 8.92 | 4.74 | 5.04 | 51.47 |
| 07-03 | 2 | 13 | 8.40 | 0.95 | 6.21 | 58.76 |
| 07-15 | 2 | 11 | 9.10 | 5.05 | 5.85 | 69.63 |
| 07-03 | 3 | 17 | 8.80 | 1.18 | 7.20 | 67.45 |
| 07-15 | 3 | 14 | 8.90 | 5.10 | 6.08 | 51.75 |
| 07-03 | 4 | 24 | 8.80 | 1.09 | 7.04 | 123.58 |
| 07-15 | 4 | 16 | 8.81 | 5.70 | 7.51 | 50.07 |

注: 上午 8:00 测得

到了鱼类生理耐受区的上下限,如果环境继续恶化,鱼类将发生病变或死亡,所以这些池塘的水质都有待改善。7月18日,渔民对水质进行处理,有所好转。在实际生产过程中,2号池塘的水质最差,有几次出现鱼类浮头,并且有少量的鱼死亡。实践证明,此种分级方法的计算结果与渔业水质的实际情况基本符合,是一种适宜的评价方法。

5 结束语

溶解氧、pH、浮游植物含量、透明度和总氮含量,尤其是溶解氧含量是影响渔业水质的重要影响因素。因此,在渔业水质的管理上,要重点监测这 5 个指标,随时了解其变化趋势。

参 考 文 献

- [1] 郝大力. 路面性能的评价与分析研究[D]. 西安:长安大学,2000
- [2] 周宝同. 土地资源可持续利用评价研究[D]. 重庆:西

南农业大学,2001

- [3] 施式亮. 矿井安全非线性动力学评价模型及应用研究[D]. 福建:中南大学,2000
- [4] 张跃,邹寿平,宿芬. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京:科学出版社,1992
- [5] 刘普寅,吴孟达. 模糊理论及其应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1998
- [6] 陈雍森. 环境评价[M]. 上海:同济大学出版社,1999
- [7] Dubois D, Prade H. Fuzzy sets and systems-theory and application[M]. New York: Pleaum Press, 1980
- [8] Bezdek J C. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms [M]. New York: Pleaum Press, 1981
- [9] 彭祖赠,孙韞玉. 模糊数学及其应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002
- [10] 赵齐. 模糊数学[M]. 北京:中央民族大学出版社,1995
- [11] 汪培庄. 模糊集合论及其应用[M]. 上海:上海科学技术出版社,1983