第42卷 第3期
2023年 5月

华 中 农 业 大 学 学 报
Journal of Huazhong Agricultural University

Vol.42 No.3
May 2023,88～96

张淑雨,王魏,刘懿纬,等.基于三角模糊数层次分析法的海参养殖水质评价[J].华中农业大学学报,2023,42(3):88-96.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.03.011

基于三角模糊数层次分析法的海参养殖水质评价

张淑雨[1],王魏[1],刘懿纬[1],孙俊洋[1],李双双[2]

1.大连海洋大学信息工程学院,大连 116023;2.大连鑫玉龙海洋生物种业科技股份有限公司,大连 116000

摘要 为了解和掌握海参养殖过程水质状况,对海参养殖水质使用融合三角模糊数层次分析法的多级模糊评价方法评估。首先依据水质关键因子在海参生长过程中所起积极和消极作用将水质关键因子分类,并依据2类关键因子设计"海参养殖水质正、负相关因子模糊推理系统"。其次,将两模糊推理系统作为一级模糊,其结果作为二级模糊的输入。二级模糊系统通过一级正、负相关因子推理结果得到最终水质评价结果。在模糊推理过程中,采用三角模糊数层次分析法为海参水质关键因子赋权来提高评价结果的准确性。最后,将该方法与融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质单级模糊评价系统、海参养殖水质ANFIS模糊评价进行对比试验。结果显示,3种方法评价结果一致,融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质多级模糊评价法将模糊规则由原来的243条减少为45条,缓解了维数灾难问题;且与ANFIS模糊评价相比无需经过大量调参和训练,占用系统资源更少。以上结果表明,融合三角模糊数层次分析法更适用于海参养殖中的水质评价与管理。

关键词 海参养殖;水质评价;模糊推理;层次分析法;多级模糊评价

中图分类号 S959 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)03-0088-09

由于海参具有良好的食用价值和药用价值,其需求量近年来逐年增加[1-2],导致海参的养殖规模不断增大。但海参对养殖水质要求较高,养殖产量与养殖水质关系密切,当养殖水质不满足海参生存特性时海参会出现夏眠、冬眠、化皮甚至自溶等现象[3],如不采取相应措施保证海参养殖水质,会给养殖企业带来巨大损失。因此,对海参养殖水质评价具有重要意义。

在养殖水质评价研究中,单因子评价法往往没有考虑养殖水质中各因子间的非线性相关影响,准确性有待提高[4]。常用的多因子综合水质评价方法中,模糊综合评价法得到的水质评价结果与水质实际情况较为相符,使用广泛[5],但模糊综合评价没有考虑不同水质因子在水产生长过程中所起不同作用[6]。通过主成分分析法分析可得到养殖水体中产生主要作用的水质因子[7],将此类水质因子对养殖水产的作用与模糊推理系统结合来评价养殖水质,得到的水质指数更为科学[8]。改进的模糊综合评价法、复合模糊物元分析模型方法能够考虑时空变化对渔业水质评价的影响或对地表水环境质量等级分类,在养殖水质分析评价中取得的研究成果较好[9-10],但模糊系统存在维数灾难问题[11],对多输入问题模糊规则数将呈指数增长,且存在多规则冗余和冲突。模糊评价法权重的计算多采用定性的超标法,也缺少一定客观性。使用基于博弈论的改进传统的综合水质识别指标(improving the traditional comprehensive water quality identification index,ICWQ-II)方法、基于熵权或变异系数的ICWQII方法可测定出水中造成污染的主要污染物,但无法对水质因子自身所产生的影响进行分析[12]。基于模糊理论和变权理论、组合经典物元法(ME)、集对分析(SPA)和变系数法(VCM)等方法[13-14]在鄱阳湖和江苏宜兴草桥河的研究中,除在得出水质评价结果之外,也论证了综合评价方法对于实现河流水质评价的科学性和重要性。基于此,本研究提出一种针对海参养殖水质的融合三角模糊数层次分析法的

收稿日期:2022-09-30
基金项目:设施渔业教育部重点实验室(大连海洋大学)开放课题(202314);辽宁省教育厅青年科技人才"育苗"项目(QL201912)
张淑雨,E-mail:3112989618@qq.com
通信作者:王魏,E-mail:ww_wangwei@dlou.edu.cn

多级模糊评价方法，旨在为海参养殖水质评价提供一种新思路。

1　材料与方法

1.1　数据采集与工具

数据采集地为大连某海参企业2017—2019年海参养殖水质实测的701条数据，选取其中对海参养殖产生主要影响的关键因子：温度、盐度、pH、亚硝酸盐和氨氮5项指标数据作为评价使用数据。使用Matlab工具编码。

1.2　三角模糊数层次分析法

为选定合适的赋权方法，通过对熵权法、主成分分析法、层次分析法试验对比分析，层次分析法适合本研究。为降低层次分析法主观性带来的偏差，引入三角模糊数层次分析法为因子赋权[15]。三角模糊数层次分析法计算权重的步骤如下。

步骤1：构造模糊判断矩阵A并对模糊判断矩阵构造模糊评价因子矩阵E，如式(1)、(2)所示。根据相关文献[16-20]和实际生产中水质各因子对海参养殖的影响程度，引入数字1～9及其倒数构造三角模糊判断矩阵$A=(a_{ij})_{n\times n}$，其中，$a_{ij}=[l_{ij},m_{ij},u_{ij}]$是以$m_{ij}$作为中值的闭区间，且$a_{ji}=\left[\frac{1}{u_{ij}},\frac{1}{m_{ij}},\frac{1}{l_{ij}}\right]$。

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \ddots & \cdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$E=(e_{ij})_{n\times n}=\begin{bmatrix} 1 & 1-\frac{u_{12}-l_{12}}{2m_{12}} & \cdots & 1-\frac{u_{1n}-l_{1n}}{2m_{1n}} \\ 1-\frac{u_{21}-l_{21}}{2m_{21}} & 1 & \cdots & 1-\frac{u_{2n}-l_{2n}}{2m_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1-\frac{u_{n1}-l_{n1}}{2m_{n1}} & 1-\frac{u_{n2}-l_{n2}}{2m_{n2}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

判断矩阵标度定义规则为：两因素相比，若具有相同重要性则标度为1；当前者比后者稍重要时标度为3；前者比后者明显重要时标度为5；前者比后者强烈重要时标度为7；前者比后者极端重要时标度为9。标度为2、6、8表示上述判断中的中间值。若因素i与因素j的重要性之比为a_{ij}，则因素j与因素i重要性之比为$a_{ij}=\frac{1}{a_{ij}}$。

步骤2：计算并调整判断矩阵Q，将判断矩阵Q调整为对角线为1矩阵，记为判断矩阵P，则$P=(p_{ij})_{n\times n}$，且满足$p_{ji}=\frac{1}{p_{ij}}$，计算方法如下：

$$M=(m_{ij})_{n\times n}=\begin{bmatrix} 1 & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & 1 & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$Q=M\times E \tag{4}$$

步骤3：使用相容矩阵分析法对P进行变换得到相容矩阵$R=(r_{ij})_{n\times n}$，R满足一致性条件$r_{ij}=r_{ik}\cdot r_{kj}(k=1,2,\ldots n)$，且$r_{ii}=1$，$r_{ji}=\frac{1}{r_{ij}}$，$r_{ij}$按式(5)计算。在判断矩阵$R$中通过式(6)几何平均法计算权重。

$$r_{ij}=\left(\prod_{k=1}^{n}p_{ik}\cdot p_{kj}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{5}$$

$$W_i=\frac{\left(\prod_{j=1}^{n}a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^{n}\left(\prod_{j=1}^{n}a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}} \tag{6}$$

步骤4：一致性检验。计算一致性指标C_{I}，求得一致性比例C_{R}。C_{I}及C_{R}计算公式如式(7)、(8)所示。当$C_{\mathrm{R}}<0.10$时，认为判断矩阵的一致性是可以接受的，否则应对判断矩阵做适当修正。

$$C_{\mathrm{I}}=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \tag{7}$$

$$C_{\mathrm{R}}=\frac{C_{\mathrm{I}}}{R_{\mathrm{I}}} \tag{8}$$

1.3　融合层次法的海参养殖水质多级模糊评价

融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质多级模糊评价利用海参养殖水质关键因子可分类的特性，将海参养殖水质主要关键因子划分为正相关因子和负相关因子2类。设计海参养殖水质正相关因子模糊推理系统和负相关因子模糊推理系统，两系统作为一级模糊，再将一级模糊结果作为二级模糊的输入，由二级模糊推理系统得到最终水质评价指数。其中模糊系统模糊规则权重矩阵由三角模糊数

层次分析法求得。融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质多级模糊评价结构如图1所示。

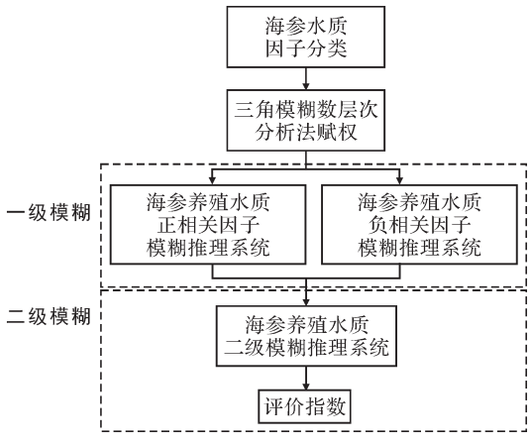


图1 融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质多级模糊系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of multilevel fuzzy system of aquacultural water quality of sea cucumber with triangular fuzzy number analytic hierarchy process

1.4 仿真试验

1)海参养殖水质因子分类。海参集约化养殖水质中,对海参生长产生影响的因子众多,其中产生主要影响的关键因子有温度、盐度、pH、亚硝酸盐和氨氮等。其中,氨氮、亚硝酸盐与海参生长呈负相关关系[21-22]。因此,将亚硝酸盐与氨氮归为"负相关因子",温度、盐度、pH归为"正相关因子"。

2)三角模糊数层次分析法因子赋权。根据本文"材料与方法1.3"公式(1)~(8),构造海参水质因子判断矩阵如表1所示,求得海参水质因子权重依次为:氨氮37.46%、亚硝酸盐26.34%、盐度10.57%、温度10.50%、pH 15.13%。

表1 海参水质因子判断矩阵

Table 1 Sea cucumber water quality factor judgment matrix

水质因子 Water quality factor	温度 Temperature	盐度 Salinity	pH	亚硝酸盐 Nitrite	氨氮 Ammonia nitrogen
温度 Temperature	1.000 0	0.440 7	0.581 4	0.509 7	0.609 1
盐度 Salinity	2.269 0	1.000 0	0.581 4	0.306 3	0.190 7
pH	1.720 1	1.720 1	1.000 0	0.509 7	0.317 3
亚硝酸盐 Nitrite	1.961 9	3.264 6	1.961 9	1.000 0	0.609 1
氨氮 Ammonia nitrogen	1.641 7	5.244 1	3.151 5	1.641 7	1.000 0

三角模糊数层次分析法的计算结果显示,最大特征根为5.366,$C_I=0.092$。根据层次分析法平均随机一致性指标,对应的R_I值为1.12,因此$C_R=C_I/R_I=0.082<0.1$,通过一致性检验。

3)模糊集划分及隶属度函数选用。海参养殖水质多级模糊评价模糊集论域等级的划分,依据海参摄食、生长研究及渔业水质标准等[23],一级模糊输入模糊集论域划分如下:当水质环境为海参最佳生长环境时,评价等级为优;当水质环境接近或达到海参最佳生长环境,适宜海参养殖时,评价等级为良;当多项指标超过海参生理耐受区上下限,海参生存困难,如不及时调控将发生病变或死亡时,评价等级为差。一级模糊输入模糊集论域划分[24-26]情况如表2所示。

表2 输入模糊集论域划分

Table 2 Domain division table of input fuzzy set theory

海参养殖水质因子 Water quality factors of sea cucumber culture	低 Low	适宜 Suitable	高 High
温度/℃ Temperature	0~9	10~16	17~28
盐度/% Salinity	0~1.5	1.6~2.8	2.9~3.4
pH	0~7.5	7.6~8.5	>8.5
亚硝酸盐/(mg/L) Nitrite	0.04~0.05	0.06~0.10	>0.10
氨氮/(mg/L) Ammonia nitrogen	0~0.04	0.05~0.18	0.19~0.27

依据上述论域特点采用指派法选定高斯型和梯形隶属度函数作为隶属度函数[27-28]。函数表达式如式(9)、(10):

$$A(x,a,\sigma)=\mathrm{e}^{-\left(\frac{x-a}{2\sigma}\right)^2} \tag{9}$$

其中,x为量值,a、σ为高斯公式的参数。

$$A(x,a,b,c,d)=\max\left(\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a},1,\frac{d-x}{d-c}\right)\right),0\right) \tag{10}$$

其中,x为量值,a、b、c、d为梯形隶属度函数参数。

一级模糊输入以温度和亚硝酸盐为例,各级输入、输出隶属度函数图像如图2~5所示。

4)模糊规则设计。以一级正相关模糊推理规则为例说明模糊规则的设计。根据试验输出结果的性质,本试验模糊规则采用IF-Then型规则。一级正相关模糊规则结构如"If温度适宜 and 盐度适宜and pH适宜,then非氮输出为优"。模糊系统权重矩阵由三角模糊数层次分析法计算得出。

5)模糊系统结构。依据上述建立各级模糊系统,系统结构如图6所示。

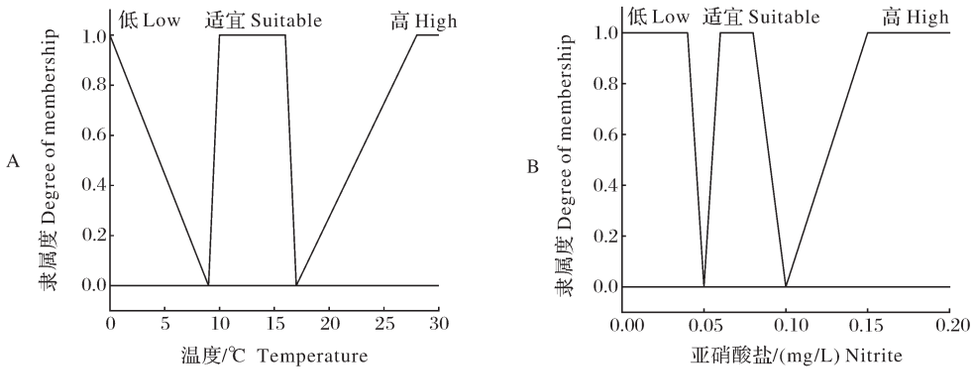
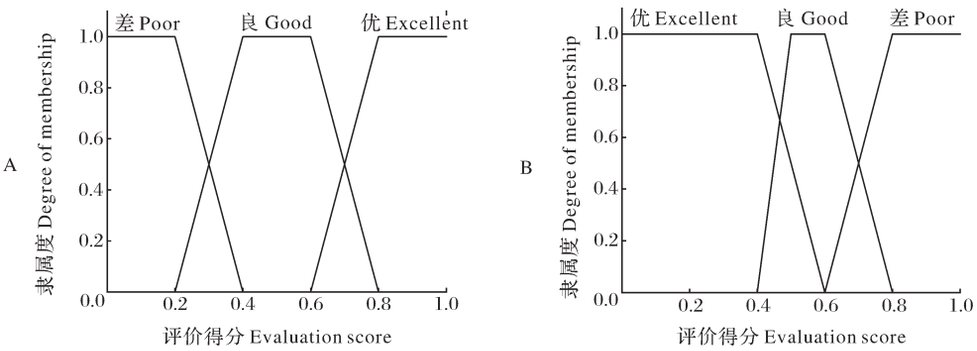


图 2　一级模糊输入温度（A）及亚硝酸盐（B）隶属度函数图

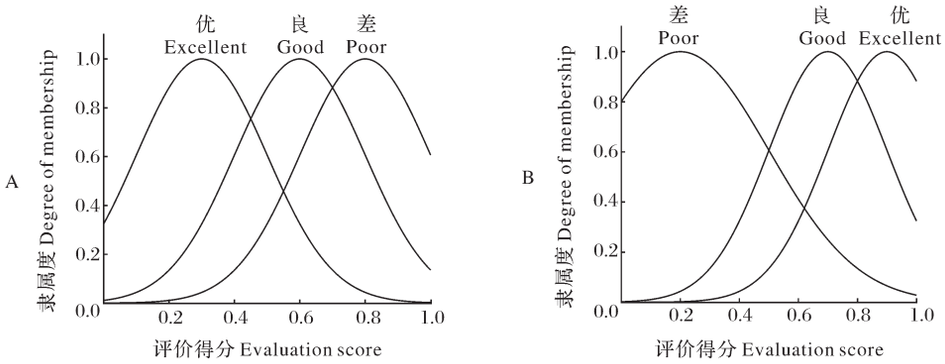
Fig. 2　First order fuzzy input temperature（A）and nitrite（B）membership function



A. 正相关输入 Positive correlation input；B. 负相关输入 Negative correlation input.

图 3　二级模糊输入隶属度函数图

Fig. 3　Membership function diagram of secondary fuzzy input



A. 负相关因子输出 Negative correlation factor output；B. 正相关因子输出 Positive correlation factor output.

图 4　一级输出隶属度函数图

Fig.4　Membership function diagram of first-level output

2　结果与分析

融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质多级模糊评价各级结构如图 7～8 所示。

为验证融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质多级模糊评价的高效性，利用已有模糊集论域的划分和隶属度函数的选用，建立融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质单级模糊评价系统和海参养殖水质 ANFIS 模糊评价系统。

2.1　融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质单级模糊评价

融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质单级模糊评价的模糊规则设计采用 IF-Then 型规则，模糊规则结构如“If 温度适宜 and 盐度适宜 and pH 适宜 and 亚硝酸盐为低 and 氨氮为低，then 输出为优”，模糊集及隶属度函数选用与多级模糊相同。融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质单级模糊评价

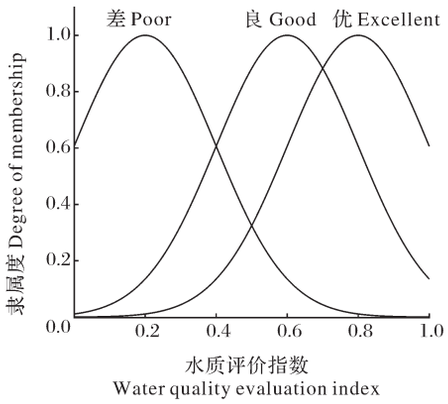


图5 二级输出隶属度函数图

Fig. 5 Membership function diagram of secondary output

的系统结构如图9所示。

2.2 海参养殖水质ANFIS模糊评价

1)ANFIS。自适应模糊推理系统(adaptive-network-based fuzzy inference system,ANFIS)是整合了模糊系统与神经网络的一种模型。该模型是一种基于数据的建模方法,模糊隶属度函数及模糊规则是由大量数据学习得到的[29],其一般结构如图10所示。

第1层:输入x,y在第一层进行模糊化。

第2层:每个特征的隶属度相乘得到规则的触发强度。

第3层:将第2层得到的每条规则的触发强度归一化,表征该规则在整个规则库中的触发比重,即在整个推理过程中使用到这条规则的程度。

第4层:计算规则的结果。

第5层:去模糊化得到确切的输出。

2)海参养殖水质ANFIS模糊评价。由于本试验的模糊输入变量有5项,每项需要训练得到3个隶属度函数,当选用梯形隶属度函数时需要有60个参数,如果模型训练数据较少而参数众多,训练出的模型效果较差。因此,将701条数据分为500组训练,100组验证,101组测试。使用Matlab构建ANFIS海参养殖水质评价模型,经过多次试验,当Epochs设置为

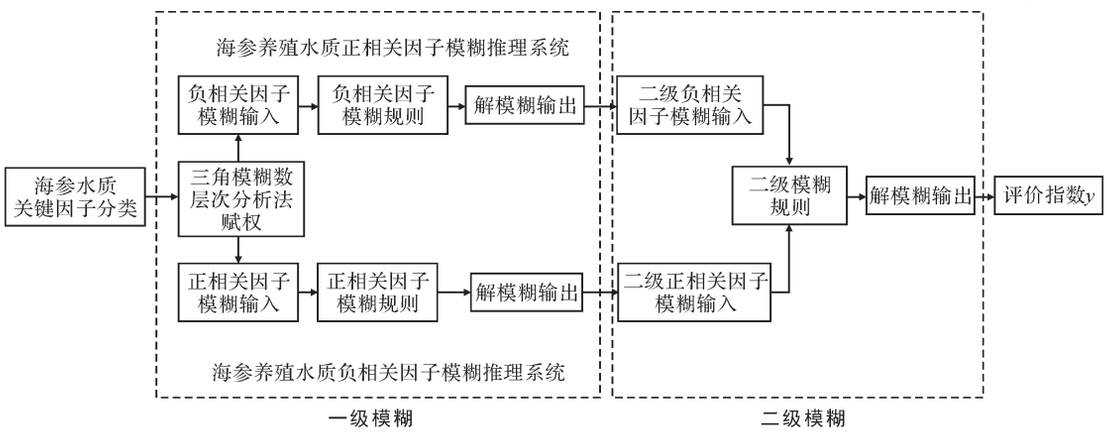


图6 多级模糊系统结构框架

Fig. 6 Multi-stage fuzzy system structure of sea cucumber aquaculture water quality with entropy weight

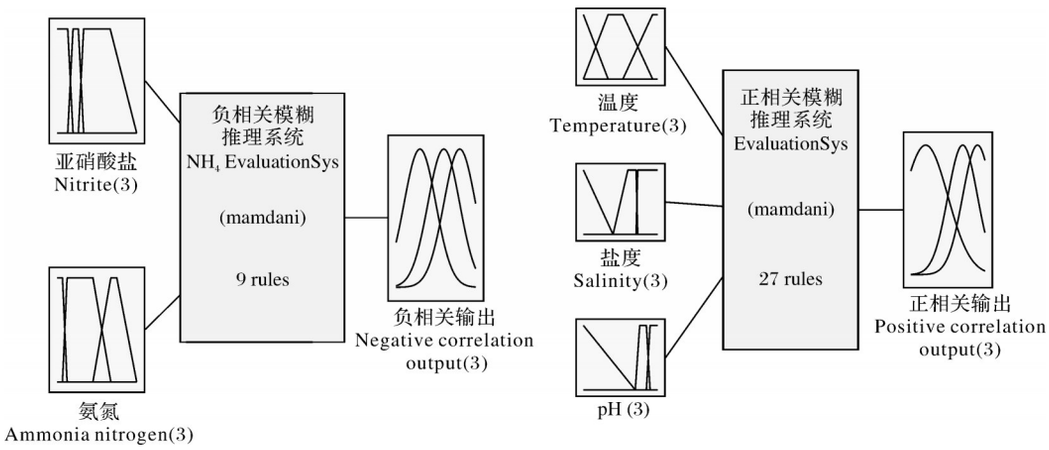


图7 一级正、负相关模糊系统结构

Fig. 7 Structure diagram of positive and negative correlation fuzzy system

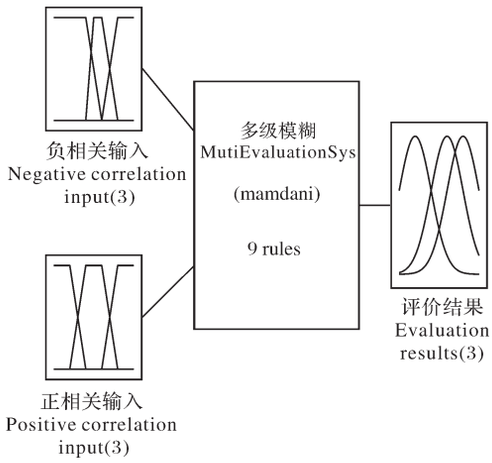


图8　二级模糊系统结构图

Fig. 8　Structure diagram of secondary fuzzy system

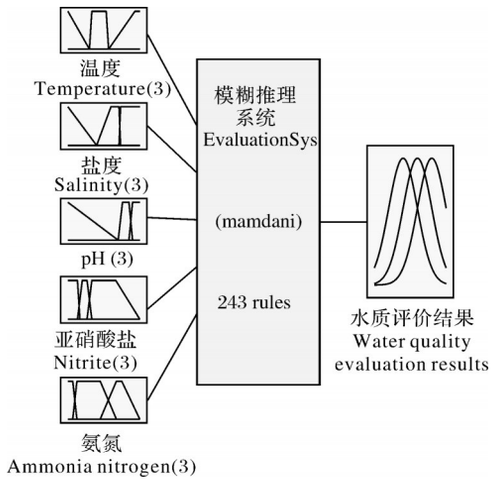


图9　融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质单级模糊评价结构

Fig. 9　Structure diagram of single level fuzzy evaluation of aquacultural water quality of sea cucumber with triangular fuzzy number analytic hierarchy process

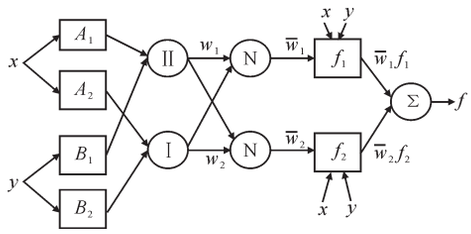


图10　ANFIS结构

Fig. 10　ANFIS structure diagram

18，Error Tolerance设置为0.2时训练结果符合要求。

2.3　试验结果对比

列举不同时间测得的10组海参养殖水质数据编号1～10，如表3所示。分别利用融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质多级模糊评价、海参养殖水质单级模糊评价和海参养殖水质ANFIS模糊评价得出水质评价结果，如表4所示。

表3　3种评价方法试验样本数据

Table 3　Experimental sample data table of three evaluation methods

编号 No.	温度/℃ Temperature	盐度/% Salinity	pH	亚硝酸盐/(mg/L) Nitrite	氨氮/(mg/L) Ammonia nitrogen
1	26.0	3.1	7.8	0.017 1	0.099 7
2	12.5	3.4	7.3	0.119 4	0.049 1
3	22.8	3.2	7.7	0.023 6	0.022 6
4	25.8	3.1	7.7	0.025 6	0.156 6
5	24.6	3.1	8.2	0.121 8	0.104 6
6	23.6	3.0	8.1	0.014 6	0.019 0
7	12.8	3.5	7.1	0.216 3	0.061 2
8	12.2	3.3	7.6	0.033 5	0.115 1
9	14.6	3.5	7.5	0.015 5	0.059 9
10	15.2	3.5	7.4	0.117 6	0.058 9

由表4可知，3种评价方法所得结果基本一致。融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质单级模糊评价与多级模糊评价得出的评价指数存在0～0.2偏差，评价结果一致。但养殖水质因子分类使海参养殖水质评价过程更科学合理。融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质多级模糊评价将模糊规则由原来的243条减少为45条，减少了81.48%。多级模糊评价简化了模糊规则设计，有效缓解了维数灾难问题。海参养殖水质ANFIS模糊评价与融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质多级模糊评价得出的评价指数存在0～0.1偏差，评价结果一致，但ANFIS模糊评价方法需一定时间调参数和多次训练，该过程占用一定系统资源。

3　讨　论

海参养殖水质中各因子间存在非线性相关性，单因子对比评价结果准确性不高。使用模糊综合评价可以提高评价准确性，但单级模糊综合评价在赋权方法和准确性上有待提升。本研究提出的融合三角模糊数层次分析法的海参养殖水质多级模糊评价方法考虑了海参养殖过程中不同水质因子对海参生长产生的不同影响，通过因子归类思想融合了三角模糊数层次分析法和多级模糊评价方法，改进了海参养殖水质评价方法，提高了评价结果的准确性。

表4 3种评价方法评价结果

Table 4 Comparison of evaluation results of the three evaluation methods

编号 No.	多级模糊系统评价 Multistage fuzzy system evaluation method		单级模糊系统评价 Single-stage fuzzy system evaluation method		ANFIS评价 ANFIS evaluation method	
	水质指数 Water quality index	评价结果 Evaluation results	水质指数 Water quality index	评价结果 Evaluation results	水质指数 Water quality index	评价结果 Evaluation results
1	0.715	优 Excellent	0.589	优 Excellent	0.617	优 Excellent
2	0.386	差 Poor	0.338	差 Poor	0.326	差 Poor
3	0.599	良 Good	0.582	良 Good	0.657	良 Good
4	0.715	优 Excellent	0.589	优 Excellent	0.619	优 Excellent
5	0.396	差 Poor	0.335	差 Poor	0.326	差 Poor
6	0.600	良 Good	0.585	良 Good	0.583	良 Good
7	0.395	差 Poor	0.383	差 Poor	0.384	差 Poor
8	0.744	优 Excellent	0.744	优 Excellent	0.744	优 Excellent
9	0.670	良 Good	0.694	良 Good	0.695	良 Good
10	0.399	差 Poor	0.331	差 Poor	0.332	差 Poor

本研究结果显示，相比单级模糊，该方法简化了模糊规则设计，缓解了单级模糊评价维数灾难问题；相比ANFIS模糊评价方法，该方法评价时间效率更高，占用系统空间资源更少。利用融合三角模糊数层次分析法的多级模糊评价方法评价海参养殖水质评价结果准确性较高，评价过程更合理。本研究可能的不足之处是所采用的水质指标数量有待扩充。后续研究将继续扩充评价指标，优化评价过程，并依据评价结果采取智能化生长调控策略。

参考文献 References

[1] 姜玉山，宋亚彩，方玲，等. 刺参对生境的选择性及其行为生理响应[J]. 水生生物学报，2022，46(6)：847-855. JIANG Y S, SONG Y C, FANG L, et al. Preliminary study on the selectivity, behavioral and physiological response of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* to different habitats[J]. Acta hydrobiologica sinica, 2022, 46(6): 847-855(in Chinese with English abstract).

[2] RU X S, ZHANG L B, LI X N, et al. Development strategies for the sea cucumber industry in China[J]. Journal of oceanology and limnology, 2019, 37(1): 300-312.

[3] 吕兴霜，张永勤，王鹏博，等. 海参体壁自溶机制及其控制技术的研究进展[J]. 食品工业科技，2020，41(3)：327-331. LÜ X S, ZHANG Y Q, WANG P B, et al. Research progress of autolytic mechanism and control technique of sea cucumber body wall [J]. Science and technology of food industry, 2020, 41(3): 327-331 (in Chinese with English abstract).

[4] YOU G D, XU B, SU H L, et al. Evaluation of aquaculture water quality based on improved fuzzy comprehensive evaluation method[J/OL]. Water, 2021, 13(8): 1019[2022-09-30]. https://doi.org/10.3390/w13081019.

[5] 朱引弟，陈星，孟祥永. 基于改进模糊综合评价法的太湖水质评价[J]. 水电能源科学，2013，31(9)：42-44，247. ZHU Y D, CHEN X, MENG X Y. Water quality evaluation of Taihu Lake based on improved fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Water resources and power, 2013, 31(9): 42-44, 247(in Chinese with English abstract).

[6] CARBAJAL-HERNANDEZ J J, SANCHEZ-FERNANDEZ L P, CARRASCO-OCHOA J A, et al. Immediate water quality assessment in shrimp culture using fuzzy inference systems[J]. Expert systems with applications an international journal, 2012, 39(12): 10571-10582.

[7] ZHANG X Y, ZHANG Y Q, ZHANG Q, et al. Evaluation and analysis of water quality of marine aquaculture area[J/OL]. International journal of environmental research and public health, 2020, 17(4): 1446[2022-09-30]. https://doi.org/10.3390/ijerph17041446.

[8] GALEZAN F H, BAYATI M R, SAFARI O, et al. Evaluating the rearing condition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) using fuzzy inference system [J/OL]. Aquacultural engineering, 2020, 89: 102051 [2022-09-30]. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102051.

[9] 刘金金，张玉平，李晓蓓，等. 熵权法模糊物元模型在养殖水质评价中的应用[J]. 水产科技情报，2021，48(2)：103-111. LIU J J, ZHANG Y P, LI X B, et al. Application of fuzzy matter-element model based on entropy weight method in water quality assessment of culturing ponds[J]. Fisheries science & technology information, 2021, 48(2): 103-111(in Chinese with English abstract).

[10] 孙猛，魏代艳，赵吉睿，等. 天津市海水养殖废水排放的分布及水质评估[J]. 江苏农业科学，2020，48(19)：263-268. SUN M, WEI D Y, ZHAO J R, et al. Distribution and water quality assessment of mariculture wastewater discharge in Tianjin City[J]. Ji-

angsu agricultural sciences,2020,48(19):263-268(in Chinese).

[11] NAYAK J G,PATIL L G,PATKI V K.Development of water quality index for Godavari River (India) based on fuzzy inference system[J/OL].Groundwater for sustainable development,2020,10: 100350 [2022-09-30]. https://doi. org/10.1016/j.gsd.2020.100350.

[12] LIU Y,HU Y C,HU Y M,et al.Water quality characteristics and assessment of Yongding New River by improved comprehensive water quality identification index based on game theory[J]. Journal of environmental sciences,2021,104:40-52.

[13] LI B,YANG G S,WAN R R,et al.Using fuzzy theory and variable weights for water quality evaluation in Poyang Lake,China [J].Chinese geographical science,2017,27(1):39-51.

[14] WANG Y M,RAN W J,WU L,et al.Assessment of river water quality based on an improved fuzzy matter-element model[J/OL]. International journal of environmental research and public health, 2019, 16 (15) : 2793 [2022-09-30]. https://doi. org/10.3390/ijerph16152793.

[15] 罗保峰,王清贤,朱俊虎,等.一种基于三角模糊数及层次分析法的评估指标权重确定方法[J].电信技术研究,2013(6):9-16. LUO B F,WANG Q X,ZHU J H,et al.An evaluation index weight determination method based on triangular fuzzy number and analytic hierarchy process[J].Research on telecommunication technology,2013(6):9-16(in Chinese with English abstract).

[16] 李碧莹,马晓娜,田会芹,等.盐度对养殖水体中总氮总磷浓度测定的影响研究[J].海洋湖沼通报,2021,43(5):127-135.LI B Y,MA X N,TIAN H Q,et al.Effects of salinity on determining total nitrogen and total phosphorus in aquacultural water[J]. Transactions of oceanology and limnology,2021,43(5):127-135 (in Chinese with English abstract).

[17] 周敏,宁文,陈红菊,等.降解亚硝酸盐的大山芽孢杆菌JY-1的分离、鉴定及其作用[J].中国水产科学,2022,29(2):284-294. ZHOU M,NING W,CHEN H J,et al.Isolation,identification and function of a nitrite-degrading strain JY-1[J].Journal of fishery sciences of China,2022,29(2):284-294(in Chinese with English abstract).

[18] 贾旭颖,国先涛,王芳,等.非离子氨胁迫对淡水和海水养殖凡纳滨对虾呼吸代谢酶活力影响的比较[J].水产学报,2014,38(11):1837-1846.JIA X Y,GUO X T,WANG F,et al.Comparison of the effect of nonionic ammonia stress on respiratory metabolic enzyme of *Litopenaeus vannamei* in seawater and freshwater [J].Journal of fisheries of China,2014,38(11):1837-1846(in Chinese with English abstract).

[19] 贾旭颖,张丹,路允良,等.温度突变和非离子氨胁迫对淡水养殖凡纳滨对虾 cyt-C 和 caspase-3 的影响[J].中国水产科学,2014,21(4):700-710.JIA X Y,ZHANG D,LU Y L,et al.Effects of abrupt change in temperature and non-ionic ammonia on the cyt-C and caspase-3 of *Litopenaeus vannamei* in freshwater [J].Journal of fishery sciences of China,2014,21(4):700-710 (in Chinese with English abstract).

[20] 王忠菊,卫广松,董美艳,等.高温天气对海参养殖业的影响及其应对措施[J].南方农业,2018,12(36):106-107.WANG Z J,WEI G S,DONG M Y,et al.Influence of high temperature on sea cucumber breeding industry and its countermeasures[J]. South China agriculture,2018,12(36):106-107(in Chinese).

[21] 姚雪梅,王红勇,邢少雷,等.不同水温和水质理化因子对糙海参摄食、生长影响研究[J].水产科学,2007,26(5):292-295. YAO X M,WANG H Y,XING S L,et al.The effects of temperature and water quality on feeding and growth of *Holothuria scabra*[J].Fisheries science,2007,26(5):292-295(in Chinese with English abstract).

[22] 黄勇,戴习林. 氨氮慢性胁迫对凡纳滨对虾肝胰腺氨代谢相关指标及细胞凋亡的影响[J]. 南方农业学报,2022,53(10):2804-2811. HUANG Y,DAI X L. Effects of chronic ammonia nitrogen stress on indexes related to ammonia metabolism and apoptosis in hepatopancreas of *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of southern agriculture,2022,53(10):2804-2811 (in Chinese with English abstract).

[23] 王瑞梅,傅泽田,何有缘.池塘淡水养殖水质模糊综合评价系统的设计与实现[J].安徽农业科学,2010,38(32):18007-18010. WANG R M,FU Z T,HE Y Y.Design and implementation of aquaculture pond water quality assessment system based on fuzzy mathematics[J].Journal of Anhui agricultural sciences,2010,38(32):18007-18010(in Chinese with English abstract).

[24] 李宝泉,杨红生,张涛,等.温度和体重对刺参呼吸和排泄的影响[J].海洋与湖沼,2002,33(2):182-187. LI B Q,YANG H S,ZHANG T,et al.Effect of temperature on respiration and excretion of sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J].Oceanologia et limnologia sinica,2002,33(2):182-187(in Chinese with English abstract).

[25] 国家环境保护局.渔业水质标准:GB 11607—1989[S].北京:中国标准出版社,1990.State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China.Water quality Standard for fisheries: GB 11607—1989[S].Beijing: Standards Press of China, 1990(in Chinese).

[26] 周维武.海参池塘养殖水质环境调控技术[J].中国水产,2008(10):53-54.ZHOU W W.Water quality and environmental control technology of sea cucumber culture in pond[J].China fisheries,2008(10):53-54(in Chinese).

[27] 李家军,杨莉.对隶属函数确定方法的进一步探讨[J].贵州工业大学学报(自然科学版),2004,33(6):1-4.LI J J,YANG L. Further study on the determination of membership function[J]. Journal of Guizhou University of Technology (natural science edition),2004,33(6):1-4(in Chinese with English abstract).

[28] 王季方,卢正鼎.模糊控制中隶属度函数的确定方法[J].河南科学,2000,18(4):348-351.WANG J F,LU Z D. The determine method of membership function in fuzzy control[J].Henan science,2000,18(4):348-351(in Chinese with English abstract).

[29] JANG J S R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system[J].IEEE transactions on systems,man,and cybernetics, 1993,23(3):665-685.

Water quality evaluation of sea cucumber culture based on triangular fuzzy number analytic hierarchy process

ZHANG Shuyu[1], WANG Wei[1], LIU Yiwei[1], SUN Junyang[1], LI Shuangshuang[2]

1.*School of Information Engineering*, *Dalian Ocean University*, *Dalian* 116023, *China*;
2.*Dalian Xinyulong Marine Biological Seed Technology Co.*, *LTD.*, *Dalian* 116000, *China*

Abstract In order to understand and master the water quality status of sea cucumber aquaculture, a multi-level fuzzy evaluation method using a fusion of triangular fuzzy number and analytic hierarchy process was used to evaluate the water quality of sea cucumber farming. Firstly, the water quality key factors were classified based on their positive and negative effects on sea cucumber growth during the farming process, and a "positive/negative correlation factor fuzzy reasoning system for sea cucumber aquaculture water quality" was designed based on the two categories of key factors. Secondly, the two fuzzy reasoning systems were used as inputs for the first level fuzzy system, and the results were used as inputs for the second level fuzzy system. The final water quality evaluation results were obtained through the second level fuzzy system based on the first level positive/negative correlation factor reasoning results. During the fuzzy reasoning process, the triangular fuzzy number analytic hierarchy process was used to assign weights to the sea cucumber water quality key factors in order to improve the accuracy of the evaluation results. Finally, this method was compared to the single-level fuzzy evaluation system and ANFIS fuzzy evaluation system using a fusion of triangular fuzzy number and analytic hierarchy process for evaluating the water quality of sea cucumber aquaculture. The results showed that the three methods produced consistent evaluation results. The multi-level fuzzy evaluation method for sea cucumber aquaculture water quality using a fusion of triangular fuzzy number and analytic hierarchy process reduced the number of fuzzy rules from the original 243 to 45, alleviating the problem of dimensionality catastrophe. Moreover, it requires less parameter tuning and training compared to the ANFIS fuzzy evaluation system and occupies fewer system resources. These results indicate that the fusion of triangular fuzzy number and analytic hierarchy process is more suitable for water quality evaluation and management in sea cucumber aquaculture.

Keywords sea cucumber culture; water quality assessment; fuzzy reasoning; analytic hierarchy process; multilevel fuzzy evaluation

（责任编辑：边书京）