

## 层次分析法在我国海洋生态系统中的应用进展

于小涵<sup>1</sup>, 孙金辉<sup>1,2,3</sup>, 徐海龙<sup>1,2,3,通信作者</sup>

(1. 天津农学院 水产学院, 天津 300392; 2. 天津市水产生态及养殖重点实验室, 天津 300392; 3. 水产生态与养殖国家级实验教学示范中心(天津农学院), 天津 300392)

**摘要:** 层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 作为一种定性与定量相结合的综合性决策方法, 已在海洋生态系统中得到应用。本文在介绍层次分析法发展历程的基础上, 对层次分析法在中国海洋生态领域中的应用现状进行总结, 并针对层次分析法在海洋生态健康评价中存在的问题给出相关建议, 以期后续层次分析法在海洋生态评价中的研究提供一定参考。

**关键词:** 层次分析法; 海洋生态系统; 中国; 应用

**中图分类号:** P76; X1

**文献标识码:** A

## Application progress of analytic hierarchy process in marine ecological assessment

Yu Xiaohan<sup>1</sup>, Sun Jinhui<sup>1,2,3</sup>, Xu Hailong<sup>1,2,3,Corresponding Author</sup>

(1. College of Fisheries, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Aqua-ecology and Aquaculture, Tianjin 300392, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Aqua-ecology and Aquaculture Education (Tianjin Agricultural University), Tianjin 300392, China)

**Abstract:** Analytic hierarchy process (AHP), as a comprehensive decision-making method combining qualitative and quantitative analysis, has been applied in marine ecological assessment. On the basis of introducing the development process of AHP, this paper summarizes the application and development status of AHP in the field of marine ecology in China. This paper also puts forward relevant suggestions for the problems existing in the application of AHP in marine ecological health assessment, so as to provide some reference for the follow-up research of AHP in marine ecological assessment.

**Key words:** analytic hierarchy process; marine ecological system; China; application

海洋生态系统是生态系统的重要组成部分。随着人类活动日益增多, 近海海洋生态系统受到的破坏越发严重, 海洋生态系统健康问题已引起了广泛关注。开展海洋生态系统诊断与评估, 进而评价海洋生态系统健康也成为研究热点内容之一<sup>[1]</sup>。海洋生态健康评价是开发、利用、保护和管理海洋生态系统的基础。但由于海洋生态系统的结构和功能复杂多变, 目前尚无统一的评价方法。

层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 是由 SAATY 基于美国各工业部门对国家福利的贡献度开展电力分配研究时提出的一种决策方法<sup>[2]</sup>。目前, 层次分析法是系统工程处理定性与定量相结合问题比较简便有效的方法, 在系统化研究领域或决策理论研究方面被广泛应用。该方法将与决策密切相关的指标划分为目标、准则和方案等层次, 通过分化复杂的评价系统和对比判断,

并在此基础上进行定性和定量的综合决策分析, 从而得到解决问题的最优方案。层次分析法普遍适用于研究具有分层交错评价指标特点的研究对象系统或目标方案难以定量描述的决策问题, 同时还具有研究思路清晰、计算简便、易于掌握的优势。目前, 层次分析法是国内生态系统健康研究中应用最早、最为广泛的综合决策方法, 已被广泛应用到我国海洋生态评价、海洋生态环境保护 and 海洋生物资源利用等方面<sup>[3-18]</sup>。本文通过探讨层次分析法在海洋生态系统中的应用现状, 分析存在的问题, 进而给出相关建议, 以期海洋生态系统健康研究, 及层次分析法在海洋生态系统领域的深入应用提供基础。

### 1 层次分析法

层次分析法是一种定性分析与定量分析相结合的多准则决策方法, 自 1971 年首次运用后, 于

收稿日期: 2021-07-10

基金项目: 农业农村部物种资源保护费(渔业)项目(1718213001354051015); 天津市规划和自然资源局财政专项(ML2020-HP-F059)

作者简介: 于小涵(1997—), 女, 硕士在读, 研究方向为海洋生态评价。E-mail: 544081509@qq.com。

通信作者: 徐海龙(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要从事渔业资源评估方面研究。E-mail: beiji80@163.com。

1977 年在国际数学建模会议上公开发表<sup>[19]</sup>, 1982 年被引入到我国, 迅速在社会经济、环境自然、海洋生态等各个领域得到广泛重视和应用。层次分析法将复杂的问题条理化、有序化, 通过两两比较的方法, 将专家意见和分析者的客观判断结果直接而有效地结合起来, 将一层次元素两两比较的重要性进行定量描述, 最后通过数学计算的方式得出权重, 并进行定量排序。

### 1.1 权重的确定

邀请多位长期从事海洋生态相关研究的专家对各层次内指标的相对重要性进行打分, 通过对同层次指标进行重要性两两比较的方法, 构建判断矩阵, 确定权重初始值, 分值标度为 1~9 之间, 1 表示两个指标同等重要, 随着数值增加, 相比较下, 一个指标较另一指标的重要程度增加, 9 表示绝对重要 (表 1)。

表 1 指标间两两比较的相对重要等级

标度	含义
1	表示两元素相比, 其有同样重要性
3	表示两元素相比, 前者比后者稍重要
5	表示两元素相比, 前者比后者明显重要
7	表示两元素相比, 前者比后者强烈重要
9	表示两元素相比, 前者比后者极端重要
2、4、6、8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若元素 <i>i</i> 与元素 <i>j</i> 的重要性之比为 $a_{ij}$ , 那么元素 <i>j</i> 与元素 <i>i</i> 重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

表 2  $RI$  的值

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$RI$	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	0.49	0.52	1.54	1.56	1.58	1.59

通过  $CI$  与  $RI$  的比值, 得出一致性比率:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

一般情况下认为一致性比率  $CR < 0.1$  时, 矩阵的不一致程度在可容许范围之内, 有满意的一致性, 通过一致性检验, 可用其归一化特征向量作为权向量, 否则要重新构造比较矩阵, 对  $a_{ij}$  加以调整。

通过一致性检验的判断矩阵为指标的权重值, 即向量  $W_i = (W_1, W_2, W_3, W_4, \dots, W_n)^T$  即为所求判断矩阵的特征向量, 也即为指标权重。

## 2 层次分析法在海洋生态研究中的应用

层次分析法在我国海洋生态研究中应用较为广泛, 尤其在海洋生态环境保护和海洋生物资源

基于重要性标度比值建立判断矩阵, 计算判断矩阵的特征值  $\bar{W}$ , 利用方根法对各指标权重进行求解:

$$\bar{W} = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (1)$$

式中,  $\bar{W}$  为判断矩阵的特征值,  $a_{ij}$  为元素  $i$  与元素  $j$  的重要性之比,  $n$  为每一行元素的个数。

得到向量  $\bar{W} = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \bar{W}_3, \bar{W}_4, \dots, \bar{W}_n)^T$ , 采用归一化的方法来获得权重值:

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i} \quad (2)$$

式中,  $W_i$  为指标  $i$  的归一化权重值, 向量  $\bar{W}$  为判断矩阵的特征值。

### 1.2 一致性检验

检验构造的判断矩阵是否合理, 是将所得的各层次指标的相对权重, 进行一致性检验<sup>[20]</sup>, 计算判断矩阵的最大特征值  $\lambda_{\max}$ , 计算公式如下:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{B_i W_i}{n W_i} \quad (3)$$

式中,  $B_i$  为判断矩阵的第  $i$  个行向量。

计算判断矩阵的一致性指标  $CI$ , 检验其一致性:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

式中,  $n$  是维数。

引入随机一致性指标  $RI$ , 来衡量  $CI$  的大小, 查找相应的随机一致性指标  $RI$  (表 2)。

利用方面。

### 2.1 海洋生态环境保护

在海洋生态环境保护方面, 层次分析法主要应用于海洋生态健康、海水富营养化、人工鱼礁等<sup>[3-13]</sup>。在评价海洋生态健康领域, 研究人员通过专家的判断以及历年科学调查数据, 利用层次分析法得到评价因子的相对重要性以及权重值, 对海域生态系统健康进行评价, 其所构建的生态系统健康评价指标体系浅显易懂, 并可以有针对性地评价某一特定海域<sup>[3]</sup>。层次分析法的引入, 有效地解决了在海洋生态评价中指标数量偏多、数据繁杂、处理困难等现实, 但需要注意的是, 在指标分级和权重确定上仍需加强量化研究, 使指标选取和数据处理更加合理、可靠<sup>[4-5]</sup>。

在海水富营养化方面,研究者引入层次分析法替代以往根据无机氮、无机磷、化学需氧量和叶绿素 a 等环境因子计算富营养化指数来评价海水富营养化程度的方法,以富营养化症状为基础,采用层次分析法构建指标体系,突破以往单纯依靠营养盐评价海洋富营养化的常规做法,为海水富营养化评价提供了全新的思路<sup>[6-9]</sup>。王昭洋等<sup>[10]</sup>在研究水体富营养化时又提出了 AHP-CRITIC 多评价指标综合赋权法,该方法可以解决水质评价中的随机性和模糊性两大问题,已广泛应用到海水及内陆水域的富营养化评价中。

在人工鱼礁的研究中,人工鱼礁作为保护海洋生态环境而人为地在海中设置的构造物,是人类行为与海洋生态直接交互的活动之一,为评价人工鱼礁区的海洋生态健康,学者们对层次分析法进行改进,大多采用层次分析法和模糊隶属函数相结合的方法确定相应指标权重<sup>[11-12]</sup>,即在两两比较每层元素重要性时采用三标度表示,建立三标度比较矩阵<sup>[12-13]</sup>。改进的层次分析法解决了传统层次分析法比较标度不准确的问题,比较矩阵的一致性有所提高。

## 2.2 海洋生物资源利用

在海洋生物资源利用方面,层次分析法主要应用于海水养殖,如鱼卵、仔稚鱼群落评估等<sup>[14-18]</sup>。海水养殖中,在对虾养殖、大菱鲆养殖等方面都采用了层次分析法<sup>[14-15]</sup>,通过构建层次分析模型,确定指标权重<sup>[16-17]</sup>,从而更加准确地评估养殖海域整体情况,有利于我国海水养殖业进一步开发。在鱼卵、仔稚鱼群落评估方面,运用层次分析法来建立适用于鱼卵、仔稚鱼的层次结构模型,解决了单一指标无法全面评估研究对象的问题<sup>[18]</sup>。层次分析法应用为海水养殖健康发展和资源评估提供了更为科学的依据。

## 3 存在的问题

在海洋生态系统研究中,由于生态系统的复杂性、监测指标筛选标准不明确、监测参数难以统一等一系列问题,现在多采用指标体系法来进行综合评价。在指标体系法中,采取层次分析法确定指标权重是最普遍的方案。李福林<sup>[19]</sup>在莱州湾南岸海水养殖开发对策中首次应用层次分析法后,该方法继而被应用在莱州湾西部海域生态系统健康综合评价等多个方面。随着层次分析法的发展,

很多学者也意识到了层次分析法在评价海洋生态系统中存在一定的局限性。

### 3.1 权重的确定存在主观性

层次分析法确定权重存在一定的主观性,最主要的表现是在专家打分方面,专家评判时的个人局限性和主观随意性问题较为突出。因此,为尽可能地减小或避免上述问题,层次分析法多与其他评价方法结合。张鹏<sup>[21]</sup>在研究南通市海域海洋生态承载力时,运用了层次分析法和熵值法的组合赋权法,即 AHP-熵值法;彭建交等<sup>[22]</sup>在研究海洋生态健康时采用层次分析法与德尔菲法结合,以减少专家打分过程中的主观成分影响。

### 3.2 指标的选取存在误差

运用层次分析法开展海洋生态系统相关研究,除专家打分时的个人局限和主观随意问题外,指标选取也是影响研究结果的重要因素之一。在指标体系选取上,评价指标会存在客观的区域性特性和选取的主观性差异。彭建交等<sup>[22]</sup>在利用层次分析法评价 14 个沿海城市的海洋健康状况时,基于“压力-状态-响应(Pressure-State-Response, PSR)”框架模型,选取了海洋捕捞产量等 15 个指标。路文海等<sup>[23]</sup>在对天津、福建、山东三地沿岸海域进行评价时,从功能多样、产出效率、压力胁迫及生态文明这四个方面,选取了单位确权海域使用面积经济产出等 14 个指标。两个研究中都涉及天津沿海,但两者在指标的选取上存在明显差异,相同指标仅有 4 个。而不同海区海洋生态间存在差异,应用层次分析法开展研究时,基于贴合研究海域生态特征的指标选取存在差异是必然。另外,选取的指标过多会导致数据分析的工作量增大,同时也易造成权重难以确定。

## 4 建议

海洋生态系统是一个结构复杂的生态系统,应用层次分析法以海洋生态系统为对象开展相关研究时,针对层次分析法存在的缺陷进行方法的改进已成为趋势,并取得了积极结果<sup>[24]</sup>。现针对层次分析法在评价海洋生态系统时存在的缺陷给出以下建议:

(1) 由于不同海域海洋生态系统的差异性,指标选取应以遵从整体性、综合性、简明性、层次性和可获性原则为基准,以研究海域海洋生态系统特征和服务于研究目标为根本,才能更有效

地反应研究海域的海洋生态系统状况。

(2) 在指标权重确定过程中,针对于评价方法的主观性,虽然有特征向量和  $CR$  值等客观定权法替代<sup>[25]</sup>,但真实度较主观法低,因此建议采用主观定权法,通过建立专家库,以专家的背景知识、对研究区域的了解程度、研究经验的丰富度等为基础,引入专家信用度<sup>[26]</sup>,取代简单将专家打分值平均处理,从而更加客观真实反应各指标的权重,以提高研究结果的可靠度。

(3) 受限于海洋生态系统的复杂性和区域性特点,及层次分析法自身定性分析与定量分析相结合的限制,无论如何改进方法在研究中的应用,得到的结果都不可避免存在误差。因此,应用层次分析法开展海洋生态系统研究,在基于研究结果分析的过程中,还需要结合研究海域实际情况进行,这样才能得到更有利于研究对象利用与保护的科学信息。

## 参考文献:

- [1] COSTANZA R, D'ARCE R, GROOT R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253–260.
- [2] SAATY T L. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw Hill, 1980.
- [3] 宋伦,王年斌,宋永刚,等. 锦州湾海域生态系统健康状况评价[J]. *中国环境监测*, 2013, 29(4): 15–20.
- [4] 赵新生,孙伟富,任广波,等. 海州湾海洋牧场生态系统健康评价[J]. *激光生物学报*, 2014, 23(6): 626–632.
- [5] 孙超,陈文,刘逸凡. 基于 AHP 法的模糊综合模型在流域生态健康评价中的应用[J]. *水文*, 2016, 36(3): 56–60.
- [6] 纪大伟,杨建强,高振会,等. 莱州湾西部海域枯水期富营养化程度研究[J]. *海洋环境科学*, 2007, 26(5): 427–429, 445.
- [7] 周艳荣,张巍,温国义. 辽东湾海域富营养化评价指标体系的构建[J]. *海洋开发与管理*, 2009, 26(8): 47–50.
- [8] 于大涛,李世龙,王紫竹,等. 辽东湾北部海区秋季海水富营养化程度分析[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(S2): 402–406.
- [9] 庞文博,张秋丰,陈燕珍,等. 基于 PSR 模型和层次分析法的渤海湾天津近岸海域富营养化评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2020(6): 111–118.
- [10] 王昭洋,王立,王小艺,等. 改进赋权的水体富营养化多维云模型评价[J]. *计算机与应用化学*, 2015, 32(3): 346–350.
- [11] 唐伟尧,唐衍力,盛化香,等. 威海西港人工鱼礁区生态系统健康评价[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(3): 55–64.
- [12] 尹增强,章守宇. 东海区资源保护型人工鱼礁生态效果评价体系的初步研究[J]. *海洋渔业*, 2012, 34(1): 23–31.
- [13] 王莹,李怡,萧云朴,等. 基于层次分析法的南麂列岛海域人工鱼礁社会效果评价[J]. *海洋开发与管理*, 2019, 36(2): 40–44.
- [14] 纪建悦,孔胶胶,刘文菁. 我国海水养殖业高效低碳评价体系研究[J]. *中国渔业经济*, 2013, 31(3): 105–108.
- [15] 戴亚娟,杨正勇. 基于层次分析法的大菱鲆工厂化养殖风险评估[J]. *黑龙江农业科学*, 2012(1): 67–70.
- [16] 李福林. 用层次分析法探讨莱州湾南岸海水养殖的开发对策[J]. *海洋与海岸带开发*, 1993(1): 18–21, 28.
- [17] 蒲新明,傅明珠,王宗灵,等. 海水养殖生态系统健康综合评价:方法与模式[J]. *生态学报*, 2012, 32(19): 6210–6222.
- [18] 潘广臣,邱盛尧,张华,等. 基于层次分析法的莱州湾鱼卵、仔稚鱼评估[J]. *海洋科学*, 2017, 41(5): 34–41.
- [19] SAATY T L, OZDEMIR M. Negative priorities in the analytic hierarchy process[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2003, 37(9/10): 1063–1075.
- [20] 常建娥,蒋太立. 层次分析法确定权重的研究[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2007(1): 153–156.
- [21] 张鹏. 南通市海域生态承载力的研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2017.
- [22] 彭建交,陈会然,谢中起. 基于 PSR 模型的沿海城市海洋生态健康评价[J]. *海洋开发与管理*, 2019, 36(10): 34–39.
- [23] 路文海,曾容,向先全. 沿海地区海洋生态健康评价研究[J]. *海洋通报*, 2013, 32(5): 580–585.
- [24] 齐福荣,李忠,武强. 可拓评价方法的改进及其应用研究[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(30): 211–213.
- [25] 蒋文能. 群组决策中专家权重确定的思路和方法[J]. *统计与决策*, 2013(2): 24–28.
- [26] XIU Z, LIU B, XIE Q, et al. Assessment of structural stability in Bohai Sea area based on AHP–GDM model[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(4): 41–48.

责任编辑:张爱婷