

DOI: 10.12131/20220253

文章编号: 2095-0780-(2023)04-0001-09

# 基于 AHP 的深水网箱养殖选址指标体系研究

张平平<sup>1</sup>, 李喆睿<sup>2</sup>, 宋怀颖<sup>1</sup>, 蔡惠文<sup>1</sup>, 夏枫峰<sup>3</sup>

1. 浙江海洋大学 海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316000
2. 西北工业大学 柔性电子研究院, 陕西 西安 615000
3. 舟山市海洋与渔业局, 浙江 舟山 316000

**摘要:** 网箱养殖区的规划和选址, 对提高经济效益和推进网箱养殖产业的可持续发展具有重要意义。然而, 影响网箱养殖的因素涉及海洋环境、生产管理和设施安全等, 是一个复杂的多因素决策过程。因此, 构建用以评估影响深水网箱养殖选址的指标体系非常重要。利用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 构建了包含3项准则层和14项指标层的深水网箱养殖选址指标体系模型, 并根据专家判断法定量化分析各项准则层和指标层各项指标的相对重要性。自然因素为准则层中影响深水网箱养殖选址的最重要指标, 其次是限制性因素, 最后是社会因素。14项二级指标中, 水质是最重要的二级指标, 影响最小的是饲料供应。基于AHP决策方法构建的深水网箱养殖选址评价指标体系, 可以定量分析不同因素的重要程度, 有助于合理布局深水网箱养殖区域, 对适宜开展深水网箱养殖的区域进行选择, 并为海洋功能区划的优化和修编提供参考。

**关键词:** 深水网箱养殖; 选址; 层次分析法; 影响因素; 评价指标体系

中图分类号: S 911

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## AHP-based evaluation index system on site selection for offshore cage culture

ZHANG Pingping<sup>1</sup>, LI Zherui<sup>2</sup>, SONG Huaiying<sup>1</sup>, CAI Huiwen<sup>1</sup>, XIA Fengfeng<sup>3</sup>

1. School of Marine Science and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China
2. Institute of Flexible Electronics, Northwest Polytechnic University, Xi'an 615000, China
3. Ocean and Fishery Bureau of Zhoushan, Zhoushan 316000, China

**Abstract:** Planning and selecting appropriate locating cage culture areas are essential for improving economic benefits and promoting the sustainable development of cage culture industry. However, several factors affecting cage culture including marine environment, production management and facility safety, which makes it a complex and multifactor decision-making process. Thus, developing an index system to evaluate the impact on the location of offshore cage culture is important. This paper employs the analytic hierarchy process (AHP) to construct an index system model for offshore cage culture site selection. The model includes three criteria layers and fourteen index layers, and we quantitatively analyzed the relative importance of each criteria layer and index layer based on expert judgment. Natural factors were the most important indicators in the criteria layer, followed by restrictive factors and finally social factors. Among the fourteen secondary indicators, water quality was the most significant, while food supply was the least. The AHP-based evaluation index system for offshore cage culture site selection can assess

收稿日期: 2022-09-21; 修回日期: 2023-03-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFE0200100); 国家自然科学基金中英国际合作重点项目(51761135013)

作者简介: 张平平(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海水养殖与渔业碳汇。E-mail: zpp1772371228@163.com

通信作者: 蔡惠文(1977—), 女, 教授, 博士, 研究方向为海水养殖与环境相互作用。E-mail: caihuiwen1977@hotmail.com

夏峰枫(1975—), 女, 工程师, 研究方向为海水养殖工程。E-mail: 39234558@qq.com

the importance of various factors accurately. The findings are beneficial for arranging offshore cage culture area appropriately, selecting regions suitable for offshore cage culture, and providing guidelines for optimizing and revising marine functional zoning.

**Keywords:** Offshore cage culture; Site selection; Analytic hierarchy process; Influencing factors; Evaluation index system

目前，网箱养殖已经成为我国渔业产业的主力军<sup>[1]</sup>。据统计，2019年中国海水网箱养殖总量达755 515 t，相较2010年，增长近99%，深水网箱在海水网箱中的比重由2010年的14.59%增长至2019年的27.16%，增长率高达270%<sup>[2-3]</sup>。可以看出，海水网箱养殖的发展，正由近岸传统网箱养殖快速走向远海深水网箱养殖。“深蓝1号”的成功不仅是超大型深海养殖设施向深海迈进的先锋，更是吹响了深水养殖网箱向深远海推进的号角，依靠科技支撑获得更长远、更持久的发展。然而，深水网箱设置在哪里才更科学、更符合可持续发展的原则，成为深水网箱养殖产业可持续发展亟待解决的问题<sup>[4]</sup>。

海水养殖区选址是综合考虑多种因素之后，对最适宜养殖的海域进行选择、论证和决策的过程，同时也是海水养殖中最重要的决策之一<sup>[4-5]</sup>。不同的养殖品种对海域的环境条件要求不同，因此，在选址过程中首先应选择对网箱养殖活动产生影响的因素或指标，并对影响因素（或指标）的重要性进行研判。Ross等<sup>[6]</sup>综合考虑地形、气候、土地利用以及水深、水流、水质等环境因子，应用GIS建模选择适宜罗非鱼网箱养殖的区域。林勇等<sup>[7]</sup>选取叶绿素a等环境因素以及研究海区到港口、城镇的距离等构建了虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)养殖适宜区的指标评价体系。Radiarta等<sup>[8]</sup>利用多标准评估模型考虑了环境因子，距城镇、码头和陆地设施的距离以及不适宜扇贝养殖的海域等建立了2个基本条件和1个限制条件，用于扇贝养殖选址。Longdill等<sup>[9]</sup>从经济和环境可持续性以及用地矛盾出发，利用多准则评估(Multi-Criteria Evaluation, MCE)法将影响贻贝生长的因素、贻贝养殖的潜在影响因素和有关其他用海和用户的因素标准化为水产养殖适用性，最后利用GIS确定养殖贻贝最适宜的位置。Shih<sup>[10]</sup>考虑经济、生产和死亡率，选取气候、地理环境、生物环境和社会经济因素研究了海水网箱养殖的选址。于谨凯等<sup>[11]</sup>从环境、经济和社会3个不同准则应用空间多标准评估模型

综合考虑了深水养殖选址。综上，任何类型的水产养殖活动选址首要考虑因素为环境因素，而对于社会因素和经济因素的选择因模型、养殖品种、管理方式不同而有差异，目前国内外尚无统一的指标体系。

深水网箱养殖主要指投饵性鱼类养殖，其选址过程不仅需要考虑养殖品种的环境需求，而且由于深水网箱养殖设施的结构本身对海洋空间具有特定要求，同时还要满足网箱养殖产业发展对社会因素的要求。选址因素的复杂性，影响因素的重要性，养殖空间(或区域)选择的决策性，都对选址方法和技术提出了更高要求。因此，本文依据深水网箱养殖生产活动的需求和管理要求，提出了一种基于层次分析法(Aalytic Hierarchy Process, AHP)的深水网箱养殖选址评价指标体系。筛选建立了深水网箱养殖区选址的指标体系，在专家打分基础上应用yaahp软件对指标体系中的所有指标进行权重的计算和排序，从而对不同因素在网箱养殖选址过程中的重要程度进行定量化分析。本评价指标体系包含了海洋环境、深水网箱养殖产业、管理等多重因素，保证了选址指标体系构建的综合性和科学性，评价指标体系和基于AHP的评价方法体现了选址的决策性，能够有效地保障养殖生产经济效益、社会管理安全和生态环境健康，对促进我国海水网箱养殖产业的可持续发展，推动网箱养殖由“近海”走向“深蓝”具有一定的科学借鉴和参考价值。

## 1 深水网箱养殖选址影响因素的筛选

深水网箱养殖的科学选址对水产养殖业向深远海发展具有极大的拓展和推动作用，是一项多因素共同影响的复杂工程。与传统网箱相比，深水网箱具有抗风浪能力强、养殖体积大、适宜海域广和初期一次性投资高等特点<sup>[12-13]</sup>，因此，首先要考虑网箱养殖海域的设施安全性和养殖安全性，避免因海域流速过大或台风等自然灾害带来的巨大经济损失<sup>[4,9]</sup>；其次，海域的水温、水质、水动力条件等要符合养殖鱼类生活习性、游泳习性和健康生长需求等<sup>[5,9,13-17]</sup>。良好的水域生态环境条件不仅能够促

进养殖鱼类的生长, 获得良好的生产效益, 而且能够减缓网箱养殖带来的环境污染问题; 同时, 使得海洋空间资源在海域环境容量范围内得到充分利用, 实现生态效益和经济效益双赢<sup>[18]</sup>。然而, 深水网箱养殖生产活动是一项社会性的海域使用活动, 需要考虑渔业养殖法律法规、最新产业政策、政府规划及海洋管理需求等社会性问题<sup>[4,9]</sup>, 避免用海矛盾, 保证与其他用户或产业和谐发展, 区域利益最大化。

可以看出, 影响深水网箱养殖产业布局的因素不仅包括养殖生产本身, 还包含海洋生态环境以及海洋管理等多个层面。因此, 综合养殖鱼类的生理生态特性、养殖设施安全性、养殖活动与环境的相互作用、养殖管理的科学性与便捷性、海洋管理的各项法律规定等实际情况, 本文筛选出 14 种影响因素, 并归纳为自然因素、社会因素和限制性因素 3 类。各级影响因素以及筛选原则具体见表 1。

**表1 深水网箱养殖选址影响因素及分析**  
**Table 1 Factors affecting offshore cage culture site selection and analysis**

一级指标 Level I indicator	二级指标 Level II indicator	指标筛选依据 Basis for indicator selection	参考文献 Reference
自然因素 Natural factor (N)	水质 Water quality	1. 为养殖鱼类提供良好的海域水环境, 保证养殖鱼类的良好生长 2. 依据《渔业水质标准》和《海水水质标准》的要求, 选择指标包括 pH 值、溶解氧、化学需氧量、无机氮和磷酸盐及重金属。其中: pH 值范围 7.5~8.5; 溶解氧质量浓度大于 5 mg·L <sup>-1</sup> ; 化学需氧量不大于 3 mg·L <sup>-1</sup> ; 无机氮质量浓度不超过 0.3 mg·L <sup>-1</sup> , 活性磷酸盐质量浓度不超过 0.03 mg·L <sup>-1</sup>	[5,9-11,19-20]
	水深 Water depth	1. 根据我国目前深水网箱箱体的大小, 水深需在 15 m 以上, 且要求最低潮位时网箱底部离海底不得小于 5 m 2. 水深不易太深, 避免增加锚泊难度 3. 易形成温跃层的水深, 不利于水体混合	[5,10,19,21]
	底质 Substrate	1. 网箱锚、桩的稳定性, 底质以平坦宽阔的沙质为宜 2. 养殖区沉积物中有机碳、硫化物等指标控制, 沙质底质为宜	[5,10,19,22]
	水温 Water temperature	依据不同鱼类的最适水温范围而定	[5,9-10,19]
	水动力 Hydrodynamics	1. 不同的鱼类品种有不同的最适生长流速需求 2. 利于残余饵料和排泄物的迅速扩散, 减少自身污染 3. 养殖设施变形许可范围内, 保障养殖鱼类的有效活动容积	[5,9-10,19,21]
	台风 Typhoon	避风条件好, 台风频率低的海区	[5,10,21]
	波浪 Wave	最大浪高小于 6 m	[5,10,21]
社会因素 Social factor (S)	养殖管理 Breeding management	1. 养殖环境实时监测; 养殖鱼的实时观察记录 2. 网箱安全检查; 网衣定期清洁 3. 饵料投放的科学调整 4. 常见鱼类疾病诊断治疗	[5,11,20,23]
	基础设施 Infrastructure	1. 海上交通便捷程度; 码头距离养殖区距离 2. 网箱阻流, 分流设施	[5,10-11,19]
	养殖品种 Breeding species	1. 养殖品种对海域的温、盐要求 2. 养殖品种对水质、水温的要求	[11,20-21,24]
	饵料供应 Food supply	1. 颗粒饵料或鲜活饵料的养殖全周期供应 2. 益生菌、维生素等疾病预防药物选择与使用	[5,10-11,20,25]
限制性因素 Limited factor (L)	海洋功能区划 Marine functional zoning	1. 具有时间属性, 是逐渐发展的 2. 养殖区符合农渔业区管理要求, 无用地冲突 3. 拟养区一定距离内无大的污染源, 无排污口, 无倾倒区 4. 远离军事管理区	[5,9-11,19,26]
	海洋环境承载力 Marine environmental carrying capacity	1. 符合海洋环境容量以及海洋环境承载力, 保持其绿色可持续发展 2. 在海洋环境承载力的范围内, 尽可能的达到规模经济, 使得生态、经济效益二效合一, 避免因养殖规模过大、密度过于集中导致污染、养殖鱼类致病	[5,11,18,20]
	管理政策 Management policy	1. 《扶持海工装备深远海养殖平台政策措施》等国家政策 2. 深远海养殖产业发展规划	[10-11,20]

## 2 基于 AHP 的深水网箱养殖选址指标体系构建

AHP 是美国运筹学家 Saaty 于 20 世纪 70 年代初首次提出，它能对涉及的所有因素进行系统分层，是一种适用于目标结构复杂且数据相对缺乏情况下的决策方法，尤其有利于解决复杂的决策问题<sup>[27-28]</sup>。网箱养殖选址是一项综合考虑自然、社会等因素，并根据其相对重要性进行决策的复杂过程。因此，可利用 AHP 对选址这一复杂的问题通过分层，将复杂问题简易化并实现数学化定量分析。yaahp 作为 AHP 辅助软件，可实现 AHP 的决策过程中的模型构造和指标权重的初步计算。

### 2.1 选址指标体系构建

根据前述关于深水网箱养殖选址影响因素的分

析，本研究利用 AHP 将影响深水网箱养殖的 3 个一级指标和 14 个二级指标分解成有序的递阶层次结构，并借助 AHP 辅助软件 yaahp 构建两两比较的判断矩阵，使主观判断转变为客观数字，实现主观判断的定量分析，从而确定层次结构中各因素的相对重要性，最后通过对结果的加权分析，得出各因素相对重要性的总体顺序<sup>[29]</sup>。本文以海水网箱养殖选址影响因素评估体系为决策层 F；自然因素、社会因素、限制性因素作为准则层（或称为中间要素层）；水质、水深、底质、水温、水动力、台风和波浪、养殖管理、基础设施、养殖品种和饵料供应、海洋功能区划、海洋承载能力、管理政策作为指标层建立深水网箱养殖选址影响因素评估模型（图 1）。

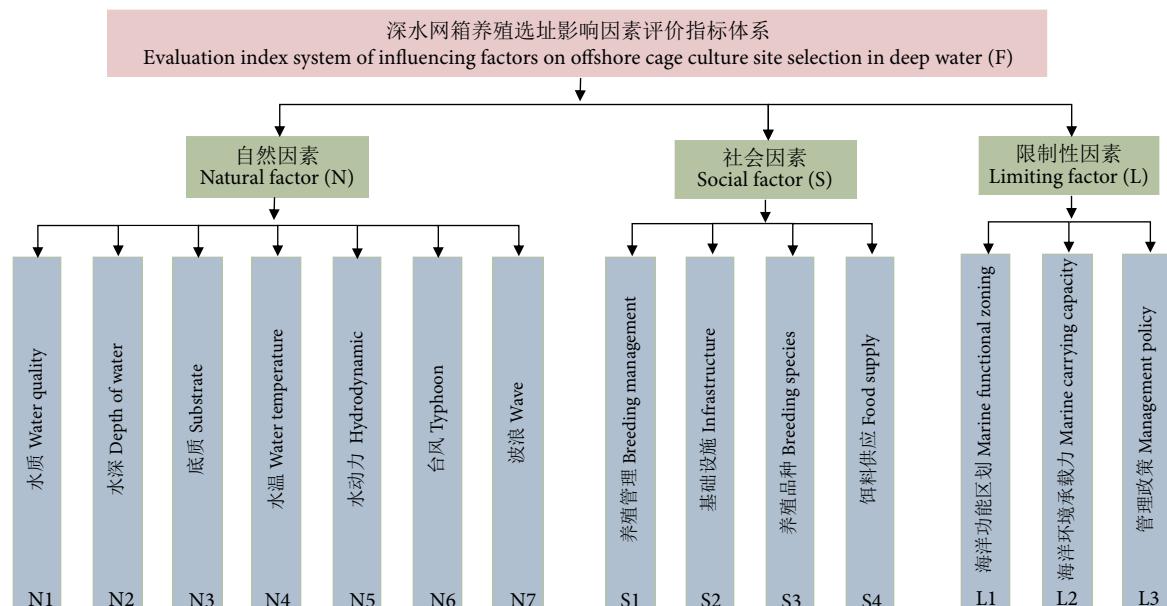


图1 深水网箱养殖选址影响因素评估模型

Fig. 1 Evaluation model of factors affecting offshore cage culture site selection

### 2.2 指标权重计算方法

在深水网箱养殖选址过程中，各指标权重的相对大小将对最终综合评价结果影响很大。本文结合理论分析、实地调查和专家评价结果在 yaahp 中不断调试判断矩阵并使其满足要求，得到准则层的最终权重和指标层的初始权重值。其主要原理是利用近似计算方法——和积法<sup>[30]</sup>求得判断矩阵的最大特征近似值和近似特征向量并进行一致性检验。

#### 1) 构造判断矩阵

设判断矩阵为  $n$  阶的正互反矩阵，若因素  $i$  与

因素  $j$  的重要性之比为  $a_{ij}$ ，那么因素  $j$  与因素  $i$  重要性之比为  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 。

#### 2) 将判断矩阵按列归一化

$$\bar{a}_{ij} = a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{kj} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

#### 3) 求和

将归一化后的判断矩阵按列相加

$$\bar{w}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

#### 4) 求近似特征向量

对向量  $\bar{W} = [\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_n]^T$  归一化

$$w_i = \bar{w}_i / \sum_{j=1}^n \bar{w}_i \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

得  $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ , 为判断矩阵  $A$  的近似特征向量。

### 5) 一致性检验

由于判断矩阵是根据理论分析、实地调查和专家评价进行的主观赋值, 不可避免会存在不一致性, 因此必须进行一致性检验。

一致性检验计算过程:

首先, 对近似特征向量进行乘幂法求积, 得到最大特征根近似值  $\lambda_{\max}$ :

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{A \times W}{w_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

其次, 计算一致性指标 CI:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (5)$$

然后, 由于 CI 不仅和最大特征根近似值  $\lambda_{\max}$  相关, 而且受  $n$  的影响也较大, 为避免当  $n$  越大, 一致性越差的情况, 引入平均随机一致性指标 RI 和随机一致性比率 CR 进行校正。

$$CR = CI / RI \quad (6)$$

一般而言, 对于小于 15 阶的判断矩阵, 其平均随机一致性指标 RI 可以查表<sup>[31]</sup> (表 2)。

表2 1~10 阶矩阵的平均随机一致性指标 RI 值

Table 2 Average random consistency index RI value of 1~10 order matrix

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
一致性指标 RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.24	1.32	1.41	1.46	1.49

最后, 如果随机一致性比率  $CR \leq 0.1$ , 则表示判断矩阵构建合理、一致性通过; 否则需要对判断矩阵不断调试, 最终得到满足条件的指标权重和排序。

## 3 深水网箱养殖选址指标重要性评价

### 3.1 判断矩阵一致性检验

根据深水网箱养殖选址影响因素评估模型, 在 yaahp 软件中分别建立准则层判断矩阵 1 个, 以及与准则层有隶属关系的指标层自然因素、社会因素以及限制性因素判断矩阵 3 个。为了对各个判断矩阵中的指标重要性进行比较和排序, 应用 yaahp 软件中的九级标度法<sup>[29]</sup> 对所建立的判断矩阵中的指标重要性进行两两比较。以此为基础, 设置调查问卷, 邀请专家分别对准则层判断矩阵和指标层判断矩阵中的各项指标进行重要性评估。调查问卷主要通过设置单项选择题的形式, 请专家对各指标的重要性按九级标度进行赋值 (表 3), 并在最后设置开放性条目让专家补充其他相关建设性意见。

共发送调查问卷 200 份, 邀请的专家为国内外从事海洋、水产养殖、海洋空间规划、环境等领域的学者。50 d 内调查问卷共收回 168 份, 有效回收率达 84%, 其中水产养殖类专家占 46.43%, 海洋环境类专家占 34.52%, 海洋空间规划专家占 19.05%。通过对回收的所有问卷进行综合分析发现: 准则层中最重要的因素是自然因素, 得分排序依次为自然因素>限制性因素>社会因素; 自然因素指标层中

表3 九级标度法

Table 3 Nine scale method

标度 Scale	标度的含义 Definition of scale
1	两个指标相比较, 同样重要
3	两个指标相比较, 一个指标比另一个指标稍微重要
5	两个指标相比较, 一个指标比另一个指标比较重要
7	两个指标相比较, 一个指标比另一个指标十分重要
9	两个指标相比较, 一个指标比另一个指标绝对重要
2、4、6、8	上述两相邻判断的中值

水质得分最高, 其次为水深、底质、水温、水动力、波浪, 台风得分最低; 社会因素指标层得分最高的是基础设施, 其次是养殖品种, 饵料供应得分最低; 限制性因素指标层得分最高的是海洋功能区划, 其次为海洋环境承载力, 最后为管理政策。

根据所有专家打分得到不同指标的最终总得分, 建立 yaahp 初代判断矩阵, 并通过改变标度为相邻中值的方法进行微调使初代判断矩阵满足一致性。鉴于不同领域的专家对各个指标的赋值情况不一致, 并对各自领域更加重视, 因此在调整指标层的初代判断矩阵时, 依据海洋环境领域的专家调整自然因素初代判断矩阵; 依据水产领域的专家调整社会因素初代判断矩阵; 依据海洋空间规划领域的专家调整限制性因素初代判断矩阵使其更加准确, 并当矩阵变化很小时, 通过微调使所有判断矩阵满足一致性<sup>[32]</sup>。各判断矩阵的随机一致性比率 CR 和

不同指标的相对权重详见表4—表7。

可以看出,构建的准则层与自然因素、社会因素和限制性因素指标层4个判断矩阵的CR值分别为0.0015、0.0378、0.0192和0.0015,均小于0.1,全部通过一致性检验,其权重值或初始权重值可以用于后续定量化评估各个指标的权重,并得到指标间的重要性关系。

### 3.2 网箱养殖选址指标相对重要性评估

基于AHP中准则层与指标层间的递阶层次关系及传递性和初始权重值,用加权平均法计算各指标的最终权重值( $W_{\text{指标最终权重}} = W_{\text{相应准则层权重}} \times W_{\text{指标的初始权重}}$ ),得到水质等影响深水网箱养殖选址的14个二级指标的相对权重值。按各指标所属中间要素层(自然因素、社会因素和限制性因素)

表4 准则层判断矩阵  
Table 4 Criteria layer judgment matrix

评估体系 F (CR=0.0015)	自然因素 Nature factor (N)	社会因素 Social factor (S)	限制性因素 Limiting factor (L)	相对权重 Relative Weight (W)
自然因素 N	1.000 0	8.000 0	3.000 0	0.681 6
社会因素 S	0.125 0	1.000 0	0.333 3	0.082 0
限制性因素 L	0.333 3	3.000 0	1.000 0	0.236 4

表5 自然因素判断矩阵  
Table 5 Judgment matrix of natural factor

自然因素 N (CR=0.0378)	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	相对权重 Relative Weight (W)
N1	1.000 0	2.000 0	7.000 0	4.000 0	2.000 0	3.000 0	5.000 0	0.312 9
N2	0.500 0	1.000 0	6.000 0	3.000 0	0.500 0	1.000 0	4.000 0	0.168 0
N3	0.142 9	0.166 7	1.000 0	0.500 0	0.200 0	0.333 3	1.000 0	0.039 0
N4	0.250 0	0.333 3	2.000 0	1.000 0	0.500 0	0.500 0	4.000 0	0.088 5
N5	0.500 0	2.000 0	5.000 0	2.000 0	1.000 0	3.000 0	4.000 0	0.218 8
N6	0.333 3	1.000 0	3.000 0	2.000 0	0.333 3	1.000 0	5.000 0	0.132 5
N7	0.200 0	0.250 0	1.000 0	0.250 0	0.250 0	0.200 0	1.000 0	0.040 2

表6 社会因素判断矩阵  
Table 6 Judgment matrix of social factor

社会因素 S (CR=0.0192)	S1	S2	S3	S4	相对权重 Relative Weight (W)
S1	1.000 0	0.333 3	0.500 0	3.000 0	0.171 5
S2	3.000 0	1.000 0	2.000 0	5.000 0	0.470 9
S3	2.000 0	0.500 0	1.000 0	4.000 0	0.284 0
S4	0.333 3	0.200 0	0.250 0	1.000 0	0.073 6

表7 限制性因素判断矩阵  
Table 7 Judgment matrix of limiting factor

限制性因素 L (CR=0.0015)	L1	L2	L3	相对权重 Relative Weight (W)
L1	1.000 0	3.000 0	8.000 0	0.681 6
L2	0.333 3	1.000 0	3.000 0	0.236 4
L3	0.125 0	0.333 3	1.000 0	0.082 0

及各指标的权重大小进行重要性程度排序, 结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 在对深水网箱养殖选址造成影响的诸多要素中, 自然因素权重为 0.681 6, 影响最大; 限制性因素权重为 0.236 4, 次之; 社会因素权重为 0.082 0, 影响最小。各项要素对选址的影响存在较大差异。在自然因素中, 影响最大的是水质, 权重为 0.213 3; 其次是水动力、水深、台风和水温, 权重在 0.100 0 左右; 最后是波浪和底质, 权重在 0.020 0 左右。在限制性因素中, 影响

最大的是海洋功能区划, 其次是海洋承载力, 最后是管理政策, 权重依次为 0.161 2、0.055 9 和 0.019 4。在社会因素中, 权重均小于 0.100 0, 最大是基础设施 (0.038 6), 最小是饵料供应 (0.006 0), 中间则是养殖品种 (0.023 3) 和养殖管理 (0.014 1)。

总体而言, 影响深水网箱养殖选址的 14 个二级指标 (或影响因素) 的相对重要性依次为水质>海洋功能区划>水动力>水深>台风>水温>海洋环境承载力>基础设施>波浪>底质>养殖品种>管理政策>养殖管理>饵料供应。

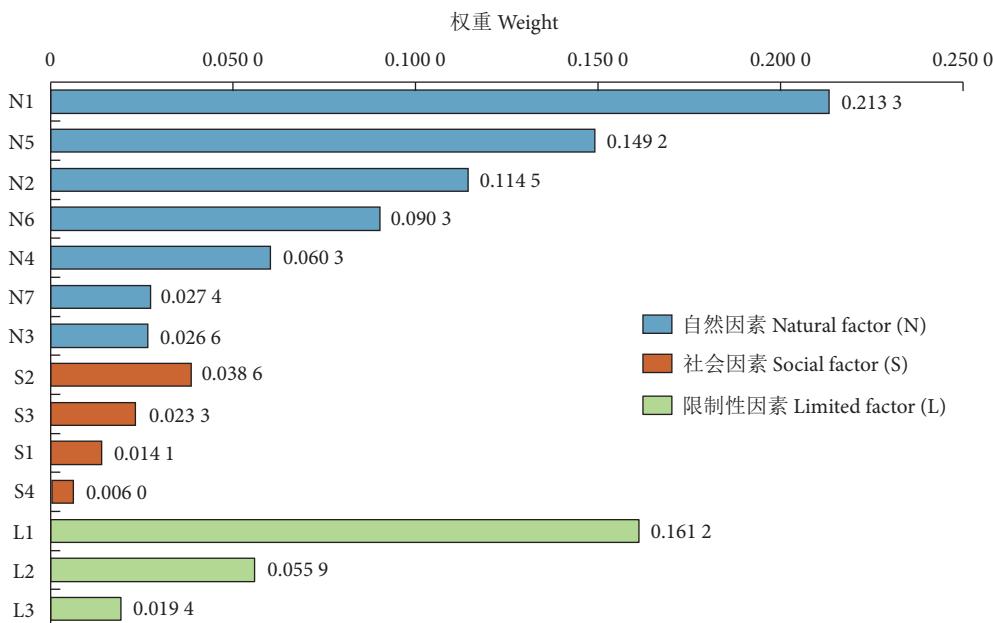


图2 深水网箱养殖选址评价指标体系因子权重分配图

Fig. 2 Factor weight distribution of evaluation index system of factors affecting offshore cage culture site selection

海域自然环境条件是直接决定海水养殖活动能否实施的首要条件, 因此, 自然因素往往是首选且最重要的指标。本研究对各影响因素量化分析计算发现, 准则层的自然因素权重值为 0.681 6, 远高于社会因素和限制性因素。邱明等<sup>[19]</sup>在深水网箱养殖影响因素分析时, 得出自然因素的权重为 0.67, 社会因素为 0.33, 即自然因素>社会因素, 且在自然因素的二级指标层中, 其重要性排序为水质>水温>水动力>水深>底质, 与本研究中关于准则层和自然因素指标层各指标相对重要性的判断基本一致。Shih<sup>[10]</sup>在利用 AHP 研究海水网箱养殖选址时选择气候、自然、生物和社会经济等 17 个二级指标, 其中, 综合归纳得出包含台风、水质和水深等 8 个自然因素, 包含渔港距离和城镇距离 2 个

社会因素, 包含立法和用地矛盾等 3 个限制性因素, 其准则层权重值分别约为 0.611、0.128、0.140, 其相对重要性与本研究一致, 但在自然因素指标层下台风权重最大, 其余权重相对重要性与本文一致。

### 3.3 深水网箱养殖区选址指标分析与讨论

在关于选址影响因素的研究中, 有些将海洋功能区划作为限制性因素, 而有些并未考虑这一因素。林勇等<sup>[7]</sup>在虾夷扇贝养殖的适宜性综合评价中得出自然因素权重值最大为 0.70, 而社会因素和限制性因素的权重值分别为 0.16 和 0.14, 该研究评价虾夷扇贝的适宜性时未考虑海洋功能区划这一因素, 因此其限制性因素的权重略低。而本研究中海洋功能区划的综合权重值为 0.161 2。海洋功能区划制度在规范我国近海海洋开发利用项目和海洋管

理过程中起了非常重要的作用，规范了各类海洋开发利用活动，在海洋开发活动以及建设项目管理中具有一票否决权，因此在一定程度上遏制了海域使用的无序、无度现象，保护了海洋环境，促进了海洋资源的合理配置<sup>[26]</sup>。然而，海洋功能区划的制定主要依据用海适宜性评价、海洋承载强度能力及海域适应性承载关系等作出判定。整体而言，海洋功能区划对海洋空间用途、开发利用度、内外平衡等实际应用中缺乏兼容性判定<sup>[26,33]</sup>，同时，海洋功能区划体系亟待理顺、增加陆海统筹和深入参与全球海洋治理。2019年国家提出全面开展国土空间规划工作，海洋空间规划将在未来成为指导海洋资源利用、海洋空间使用和陆海统筹的主要依据<sup>[33-34]</sup>。然而，海洋空间规划尚未出台之前，海洋功能区划仍然作为当前海洋空间开发的管理依据。本研究基于AHP模型，构建了深水网箱养殖选址指标体系，以期为适宜开展深水网箱养殖的海洋空间分布及选址提供基础。

海水养殖系统主要可以分成投饵型养殖系统(鱼类)和非投饵型养殖系统(贝、藻类)，因其养殖生物的生理生态不同，对环境条件的要求也有差异，因此，在三级指标的选取上会因具体养殖品种不同而存在差异。养殖品种不同，主要影响的是选址因素指标体系构建过程中的第三层，即指标层中某些具体指标的筛选。但无论哪个养殖品种，无论具体指标如何选择，均需对各因素的相对重要性进行计算和评估。对于多层次多因素评价指标体系构建、多因素活动过程的决策制定以及养殖品种的选址，AHP都具有非常重要的应用价值。根据调查发现，从1984年至今，AHP的应用涉及到风险、管理、路径和选址等多个方面<sup>[35-37]</sup>，一直是构建评价模型、评价体系、指标体系，计算指标权重等的一个重要方法，AHP不仅可以对因素的重要性进行主观判断定量化，还可以通过构建两两比较的判断矩阵和一致性检验，进一步提高每个指标权重的精确度和科学性，有效减少指标权重的误差。因此，利用AHP建立的深水网箱养殖选址模型可以充分地指导网箱养殖选址实践，并可应用于其他养殖品种的选址和优化过程。

#### 4 结论

在深水网箱养殖选址影响因素分析中，本研究

综合考虑了养殖鱼类的生长条件与生态影响、经济投入、基础设施与海洋管理等实际情况以及文献报道，选取3个一级指标和14个二级指标，并利用AHP对各指标的相对重要性进行分析，得出如下结论：

1) 选取自然因素、社会因素和限制性因素作为影响深水网箱养殖选址的一级指标，并且认为海洋功能区划限制性因素是一个限制而非决定性的二级指标。

2) 借助AHP辅助软件yaahp构建了一个包含准则层和指标层的深水网箱养殖选址指标体系。同时，将不同领域专家对影响深水网箱养殖选址指标的相对重要性进行主观判断客观化，得出在准则层中，自然、社会和限制性因素权重值分别为0.6186、0.2364和0.0820，自然因素对深水网箱的选址影响最大，限制性因素次之，社会因素最小。在自然因素指标层中，对深水网箱选址影响最大的是水质，权重值为0.2133，其余依次为水动力、水深、台风、水温、波浪、底质；在社会因素指标层中，权重值最大的是基础设施，其他3种指标权重排序依次为养殖品种>养殖管理>饵料供应；在限制性因素指标层中，海洋功能区划权重最大，其次是海洋承载力，最后是管理政策。

3) 影响深水网箱养殖选址的14个二级指标中，其重要性依次为水质>海洋功能区划>水动力>水深>台风>水温>海洋环境承载力>基础设施>波浪>底质>养殖品种>管理政策>养殖管理>饵料供应。

网箱养殖的选址是一个由近岸至深远海、由半开放式至全开放式水域发展的渐进过程。随着各项技术水平的不断提高，网箱养殖在我国大陆沿海水域有较大的发展空间。确定影响因素的相对重要性至关重要，在后续的选址中，不仅需要根据这些权重选择适宜区，还需考虑适宜区的养殖面积，排除面积过小的适宜区，从而得到最佳适宜区。

#### 参考文献：

- [1] 李文蕾,李淑翠,李达,等.我国海水网箱养殖业的现状与前景分析 [J].科技资讯,2018,12: 237,239.
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会.2020中国渔业统计年鉴 [M].北京:中国农业出版社,2020: 21.
- [3] 农业部渔业局.中国渔业统计年鉴 [M].北京:中国农业出版社,2000: 24.

- [4] FALCONER L, TELFER T C, ROSS L G. Investigation of a novel approach for aquaculture site selection[J]. *J Environ Manage*, 2016, 181: 791-804.
- [5] 石建高, 王鲁民, 徐君卓, 等. 深水网箱选址初步研究 [J]. 现代渔业信息, 2008, 23(2): 9-12, 22.
- [6] ROSS L G, FALCONER L L, MENDOZA A C, et al. Spatial modelling for freshwater cage location in the Presa Adolfo Mateos Lopez (El Infiernillo), Michoacán, México[J]. *Aquac Res*, 2011, 42(6): 797-807.
- [7] 林勇, 刘述锡, 关道明, 等. 基于 GIS 的虾夷扇贝养殖适宜性综合评价——以北黄海大小长山岛为例 [J]. 生态学报, 2014, 34(20): 5984-5992.
- [8] RADIARTA I N, SAITO S I, MIYAZONO A. GIS-based multi-criteria evaluation models for identifying suitable sites for Japanese scallop (*Mizuhopecten yessoensis*) aquaculture in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan[J]. *Aquaculture*, 2008, 284(1/2/3/4): 127-135.
- [9] LONGDILL P C, HEALY T R, BLACK K P. An integrated GIS approach for sustainable aquaculture management area site selection[J]. *Ocean Coast Manage*, 2008, 51(8/9): 612-624.
- [10] SHIH Y C. Integrated GIS and AHP for marine aquaculture site selection in Penghu Cove in Taiwan[J]. *J Coast Zone Manag*, 2017, 20(1): 1-6.
- [11] 于谨凯, 于高燕. 基于空间多标准分析的海水养殖空间布局优化标准研究 [J]. 科技管理研究, 2017, 37: 246-252.
- [12] 胡昱, 郭根喜, 汤涛林, 等. 基于 MCFS 的深水网箱自动投饵远程控制系统的设计 [J]. 渔业科学进展, 2010, 31(6): 110-115.
- [13] 刘吉伟, 王宏策, 魏鸿磊. 深水网箱养殖自动投饵机控制系统设计 [J]. 机电工程技术, 2018, 47: 145-148.
- [14] 邓素芳, 杨有泉, 陈敏. 全自动饵料精量投喂装置的研究 [J]. 农机化研究, 2010, 32: 103-105, 109.
- [15] 郭根喜, 陶启友, 黄小华, 等. 深水网箱养殖装备技术前沿进展 [J]. 中国农业科技导报, 2011, 13: 44-49.
- [16] 桂福坤, 王萍, 吴常文. 适应条件对鱼类续航游泳能力的影响 [J]. 水产学报, 2010, 34(8): 1227-1235.
- [17] FALCONER L, HUNTER D C, SCOTT P C, et al. Using physical environmental parameters and cage engineering design within GIS-based site suitability models for marine aquaculture[J]. *Aquac Environ Interac*, 2013, 4(3): 223-237.
- [18] 邢聪聪, 赵蓓, 刘娜娜, 等. 我国海洋资源环境承载力评价指标体系和评价方法 [J]. 海洋开发与管理, 2019, 36: 33-35.
- [19] 邱明, 张燕, 隋传国, 等. 基于 GIS 的深水网箱养殖适宜性评价——以长海县为例 [J]. 渔业研究, 2018, 40(6): 449-457.
- [20] READ P, FERNANDES T. Management of environmental impacts of marine aquaculture in Europe[J]. *Aquaculture*, 2003, 226(1/2/3/4): 139-163.
- [21] 廖静. 广东深水网箱: 拓展海水养殖新空间 [J]. 海洋与渔业, 2017(7): 34-35.
- [22] KLAUDATOS S D, SMITH J, BOGDANOS K, et al. Assessment of site specific benthic impact of floating cage farming in the eastern Hios island, Eastern Aegean Sea, Greece[J]. *J Exp Mar Biol Ecol*, 2006, 338(1): 96-111.
- [23] 高勤峰, 张恭, 董双林. 网箱养殖生态学研究进展 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2019, 49: 7-17.
- [24] 徐琰斐, 徐皓, 刘晃, 等. 中国深远海养殖发展方式研究 [J]. 渔业现代化, 2021, 48: 9-15.
- [25] 周晓林, 姬广闻, 焦仁育, 等. 网箱养鱼自动投饵机的设计与应用 [J]. 淡水渔业, 2003, 33: 36-37.
- [26] 狄乾斌, 韩旭. 国土空间规划视角下海洋空间规划研究综述与展望 [J]. 中国海洋大学学报 (社会科学版), 2019(5): 59-68.
- [27] AGUILAR-MANJARREZ J, KAPTESTY J, SOTO D. The potential of spatial planning tools to support the ecosystem approach to aquaculture[R]. Rome: FAO, 2010.
- [28] 童英华, 冯忠岭, 张占莹. 基于 AHP 的雾霾影响因素评价分析 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 2020, 45(3): 87-94.
- [29] ELIF N E, İSMAIL E. A study on shopping malls performance criterias analysis using AHP method[J]. *J Polytech*, 2019, 23(1): 85-95.
- [30] KAPETSKY J M, HILL J M, WORTHY L D. A geographical information system for catfish farming development[J]. *Aquaculture*, 1988, 68(4): 311-320.
- [31] 洪志国, 李焱, 范植华, 等. 层次分析法中高阶平均随机一致性指标 (RI) 的计算 [J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(12): 4.
- [32] 曹索贝, 杨荣美. “双碳”目标下构建甘肃电力行业碳审计评价指标体系——基于 DSR-AHP 模型分析 [J]. 陇东学院学报, 2022, 33: 34-39.
- [33] 李彦平, 刘大海, 姜伟, 等. 国土空间规划视角下海洋空间用途管制的关键问题思考 [J]. 自然资源学报, 2022, 37: 895-909.
- [34] 农昀. 国土空间规划视角下的海洋空间规划编制思考 [C]//2020/2021 中国城市规划年会暨 2021 中国城市规划学术季. 成都: 中国城市规划学会, 2021: 86-92.
- [35] 房卓, 沈忱, 徐杏, 等. 基于层次分析法的汕头港内陆港选址研究 [J]. 水运工程, 2020(12): 70-75.
- [36] ALI H. A systematic bibliometric analysis of the analytic hierarchy process from 1980 to 2020[J]. *Int J Bibliometrics Business Manage*, 2022, 2(2): 148-169.
- [37] 江海浩, 周书葵, 陈朝猛, 等. 基于改进 DRASTIC 模型、GIS 和层次分析法 (AHP) 的地下水 U(VI) 污染风险评价 [J]. 环境工程, 2015, 33(3): 113-117, 130.