

基于层次分析法的人工鱼礁选址适宜性评价方法*

张子牛^{1,2} 王珍岩^{1,2,3,4} 李桂花¹ 赵美涵^{2,4}

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院 山东青岛 266590; 2. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室 山东青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室 山东青岛 266237; 4. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 人工鱼礁作为渔业资源增殖的有效手段,在海洋牧场建设中发挥重要作用。人工鱼礁区的科学选址是海洋牧场建设需首先解决的技术问题。目前关于人工鱼礁选址还没有通用的定量评价方法。基于层次分析法理论建立层次结构模型,设定社会、物理、工程、化学和生物环境等 5 个主要准则因素,设定海洋功能区划、水深、水流、底质类型、底质荷载、淤泥层厚度、海底坡度、水质、沉积物质量、赤潮、浮游植物、浮游动物、底栖生物等 13 个次级准则因素并作为评价指标,其中将水质和沉积物质量设定为多参数指标。依据相关国家标准和行业规范,采用多种归一化处理方法建立所有指标的定量评价标准。结合对人工鱼礁建设实际情况的分析,确定主要准则因素权重。考虑人工鱼礁渔业资源增殖效应,增加对两类特殊情况的评价判定过程。其中两类特殊情况分别为单一指标参数值超限情况和多参数指标中多个参数值接近超限的情况。使用 Python 编程语言创建软件系统实现评价结果的高效计算并输出对应适宜性等级。根据日照市海洋牧场示范区中适宜人工鱼礁建设海域调查数据模拟 8 个针对性的海区案例对方法进行验证,案例分析表明,该方法具有较好实用性,能有效分析并获取目标海区建礁适宜性评价结果,可为开展人工鱼礁选址提供参考依据。

关键词 海洋牧场; 人工鱼礁; 选址; 层次分析法; 评价

中图分类号 S953.1 doi: 10.11693/hyhz20230200026

人工鱼礁最初被用于诱集各种鱼类来增加渔获量(杨吝等, 2005),随着人工鱼礁建设目标的拓展以及建设规模的扩大,其功能已由单纯的鱼类诱集和捕获逐渐扩展到海域生态环境的修复和保护(陈丕茂等, 2019)。尽管人工鱼礁建设在渔业资源增殖和海洋生态环境修复等方面已取得显著成效(陈勇, 2020),但有研究显示全球超过 50%的人工鱼礁项目最终都以失败告终,其中重要原因就是选址不当(Baine, 2001)。礁区选址作为人工鱼礁建设的基础环节,其决定建设结果能否成功。选址一旦出现问题,投礁区域原有生态系统和生物群落结构的稳定性将遭到破坏,礁体留存周期也会大幅减少(Chang, 1985; Tseng *et al.*, 2001)。

人工鱼礁选址评价最早以定性描述为主,选取的参照标准较少,科学性较差(Turner *et al.*, 1969; Mathews, 1981),因此建礁失败情况较多(Chang, 1985)。排除地图方法(exclusion map, EM)的应用使选址评价开始趋于规范,用来排除不适宜人工鱼礁建设区域,但该方法不能确定适宜人工鱼礁建设的海区范围(Barber *et al.*, 2009)。而地理信息系统(geographic information system, GIS)的应用有效解决了这一问题,通过应用 GIS 绘制海区对应的人工鱼礁建设适宜性分布图来确定适宜建设海区范围(Tseng *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2015; 许妍等, 2016)。虽然 GIS 的应用可以获取海区建礁适宜性的可视化评价结果,但该方法对于海区内的多个较小范围区域的人工鱼礁建设选

* 中国科学院战略性先导科技专项, XDB42010203 号; 国家自然科学基金面上项目, 42176090 号。张子牛, 硕士研究生, E-mail: 1271563583@qq.com

通信作者: 王珍岩, 博士, 研究员, E-mail: zywang@qdio.ac.cn

收稿日期: 2023-02-06, 收修改稿日期: 2023-05-16

址适宜性评价分析工作适用性不高。针对这种情况, 有研究者通过应用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)综合分析人工鱼礁建设影响因素, 获取海区方案的人工鱼礁选址适宜性评价结果, 进行多个海区方案的优先级排序, 确定最佳方案(王飞等, 2008; 许强等, 2013)。

但 AHP 在人工鱼礁建设选址适宜性评价中的应用还不成熟, 相关选址研究在指标选取、指标量化等方面还存在一些问题。首先, 部分研究由于建设目标的不同导致选址评价影响因素的选择各有侧重, 没有形成通用的评价指标体系(徐汉祥等, 2006; 尹增强等, 2012; Xu *et al.*, 2019; 单晨枫等, 2022), 所选环境因素也不全面, 评价指标体系有待规范。其次, 建设目标的不同也影响指标量化处理, 一方面限制了指标量化方法的应用(尹增强等, 2012; 佟飞等, 2016; Jha *et al.*, 2022); 另一方面所选择的部分环境因素没有通用的量化标准, 仍以定性指标形式参与评价(温泽民, 2014)。再者, 部分研究在进行因素相对重要性分析时采用专家打分方法(Mousavi *et al.*, 2015; 曾旭等, 2018), 尽管该方法可纳入专家个人经验, 但将其作为评价依据仍存在较大的主观性和不确定性。针对这些问题, 本研究基于 AHP 方法原理在评价指标体系构建、评价标准建立、评价结果计算等方面进行创新, 旨在构建更为客观、定量的适用于人工鱼礁选址适宜性分析的评价方法, 应用于具有不同建设目标的人工鱼礁选址评价工作。

1 研究方法

研究主要包括基于层次分析法的人工鱼礁选址评价方法的构建以及对所构建方法进行的实例验证。本研究依据层次分析法原理建立人工鱼礁选址评价层次结构模型, 包括对评价指标体系的构建, 并利用层次分析法中的判断矩阵确定主要准则因素权重。然而层次分析法不能对评价指标对应参考数值进行归一化处理, 因此本研究采用 3 种指标量化方法实现这一过程。研究采用前人文献研究中人工鱼礁建设海区调查数据模拟不同海域环境条件的海区场景并设定针对性案例对方法进行验证, 并使用 Python 编程语言创建专门的评价系统快速获取评价结果。

1.1 层次分析法

AHP 是美国运筹学家 Saaty(1972)提出的一种结合定性和定量分析的系统工程方法, 方法分析步骤包括建立层次结构模型、构建判断矩阵及一致性检

验、权重分配及结果分析。建立层次结构模型是对目标问题定性分析的重要步骤, 能够将复杂问题相关因素划分层次进行分析(张吉军, 2000)。而构建判断矩阵是层次法定量分析的重要步骤, 用于确定层次因素权重, 构建过程需利用 1~9 数字量表(表 1)和两两比较法(Saaty, 1972)。

表 1 1~9 数字量表
Tab. 1 The 1~9 numerical scale of the judgment matrix

a_{ij}	意义
1	元素 i 与元素 j 对上一层次因素的同等重要
3	元素 i 比元素 j 略微重要
5	元素 i 比元素 j 重要
7	元素 i 比元素 j 重要得多
9	元素 i 比元素 j 极其重要
$2n, n=1, 2, 3, 4$	元素 i 与元素 j 的重要性介于 $a_{ij}=2n-1$ 和 $a_{ij}=2n+1$ 之间
$a_{ji}=1/n$	$n=1, 2, \dots, 9$, 当且仅当 $a_{ij}=n$

注: n 表示相对重要性; a_{ij} 和 a_{ji} 表示判断矩阵元素

判断矩阵的一致性检验是必要的, 用于排除层次因素相对重要性优先级出现异常的情况。一致性检验是一致性比率 R_C 与标准值(0.1)的比较分析过程, 如式(2)所示。一致性比率 R_C 涉及一致性指标 I_C 和随机指标 I_R (表 2), 其中 I_R 只与矩阵维数 n 有关, I_C 计算公式为式(1)。当 $R_C < 0.1$, 表明矩阵具有满意的一致性, 否则需要重新构建判断矩阵, 直到矩阵具有满意的一致性为止。

$$I_C = \frac{\lambda \max(A) - n}{n - 1}, \quad (1)$$

式中, $\lambda \max(A)$ 为判断矩阵的最大特征值, n 为矩阵维数。

$$R_C = \frac{I_C}{I_R}. \quad (2)$$

表 2 n 阶矩阵的随机指标 I_R
Tab. 2 The random index I_R of the n th-order matrix

矩阵维数	I_R
1	0.00
2	0.00
3	0.52
4	0.89
5	1.12
6	1.26
7	1.36
8	1.41
9	1.46
10	1.49

具有满意一致性的判断矩阵能够用于计算层次因素权重值,具体通过寻找判断矩阵 A 最大特征值 $\lambda_{\max}(A)$ 对应的主特征向量 w 确定层次因素的权重值,其中主特征向量 w 中的元素就是对应层次因素的权重值(Saaty, 2000)。求解主特征向量 w 的公式为式(3)。

$$Aw = \lambda_{\max}(A)w \quad (3)$$

结合各层次因素权重值对目标问题的解决方案进行比较分析,确定最优方案。然而每一次权重的变动都会影响方案的优先级顺序(Ramanathan, 2001),因此确定因素权重对获取解决目标问题的最优解具有重要意义。

1.2 指标量化方法

本研究采用二元化法、赋值法和隶属度函数法对所有指标进行归一化处理,标准化范围为 0~1, 0 代表适宜性最低, 1 代表适宜性最高, 以此建立指标的定量评价标准。统一的标准化范围不仅保证了各指标归一化值的可加和性,也保证了综合计算评价结果的可操作性。二元化法根据指标“适宜”和“不适宜”两种情况分别赋值 1 和 0, 零值代表不适宜,对结果直接否定。赋值法根据指标适宜情况合理划分等级区间并赋值;隶属度函数法则根据指标实测情况具有的连续变化特征选择相应函数模型建立评价标准。本研究选用的隶属度函数模型有三类(Mousavi *et al*, 2015),包括 S 型、Z 型和通用型,如图 1 所示。

2 人工鱼礁选址适宜性评价方法构建

本研究依据相关选址评价研究成果(许强, 2012),基于层次分析法的人工鱼礁选址适宜性评价方法的构建从评价指标体系的构建、评价指标对应评价标准的建立、主要准则因素权重的确定、评价结果的计算等步骤进行详细阐述,评价方法构建流程如图 2 所示。

2.1 评价指标体系构建及评价标准建立

本研究依据相关国家标准、行业技术规范(中华人民共和国农业部, 2014; 国家市场监督管理总局等,

2021)以及前人关于人工鱼礁选址评价研究成果(徐汉祥等, 2006; 尹增强等, 2012; Xu *et al*, 2019), 总结人工鱼礁选址评价相关环境因素一般涉及社会经济、物理、工程、化学和生物环境等方面。另外,本研究是针对泛指的人工鱼礁基础建设环境进行的选址评价工作,没有聚焦于特定养殖目标和物种。因此最终设定海洋功能区划、水深、水流、底质类型、底质荷载、淤泥层厚度、海底坡度、水质、沉积物质量、赤潮、浮游植物、浮游动物、底栖生物等 13 个环境因素为评价指标。其中,根据水质和沉积物质量相关国家标准《GB 3097-1997 海水水质标准》(国家环境保护局, 2004)和《GB 18668-2002 海洋沉积物质量标准》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2004)中的调查参数设置情况将水质和沉积物质量指标设定为多参数指标。

所选取的评价指标不仅包含与人工鱼礁投放工作相关的海洋功能区划、海区底质荷载、海底坡度等社会限制性指标和工程性质指标,也包含与人工鱼礁的渔业资源增殖、生境修复等功能有关的评价指标。水深、水流、底质类型等环境因素影响鱼礁的集鱼效果,适宜的水深、水流等条件会形成有利于海区营养物质循环的流场环境(李东等, 2019),可为鱼类及其幼鱼提供良好的生存环境。水质、沉积物质量是影响鱼类、贝类等海洋生物生长及繁衍生息的重要环境因素,良好的水质和沉积物质量是确保海洋生物高质量生长的前提条件。高饵料生物水平是形成良好渔场的生物基础,同时也是实现生物资源增殖目标的基本保证(虞聪达, 2004)。基于此,本研究通过选取评价指标,开展人工鱼礁基础建设环境选址适宜性评价分析工作,不仅可以获取目标区人工鱼礁建设适宜性评价结果,同时也能验证鱼礁投放海域是否具有有良好的渔业资源增殖能力和生境修复能力。

本研究将选取的 13 个评价指标合理划分于社会环境、工程环境、物理环境、化学环境和生物环境。社会环境因素主要设定与海洋牧场建设所在地区社

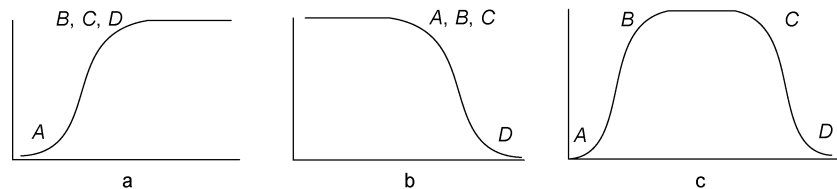


图 1 隶属度函数模型图

Fig.1 The membership function model diagram

注: a: S 型隶属度函数; b: Z 型隶属度函数; c: 通用隶属度函数; A、B、C、D 为阈值控制点; 横坐标为参考数值, 纵坐标为参考数值对应的隶属度(隶属度范围依实际情况而定)

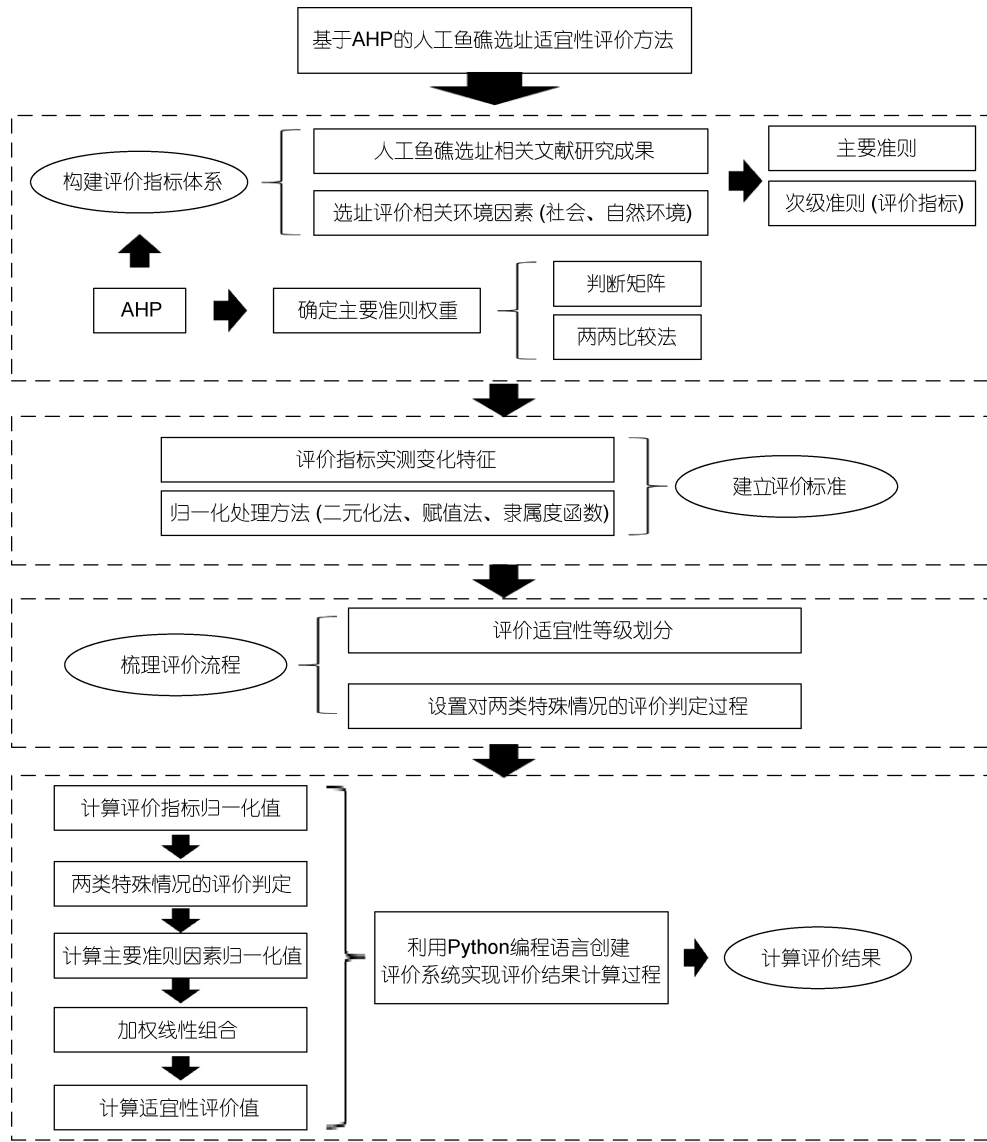


图 2 人工鱼礁选址适宜性评价流程图

Fig.2 Flow chart of site suitability evaluation for artificial reef

注: AHP 表示层次分析法。方法层次结构模型为选址评价提供模型基础, 构建评价指标体系; 其定量分析用于确定准则权重

会经济状况和海域功能使用情况相关的因素, 因此“将海洋功能区划”划分在社会环境。工程环境因素的设定主要考虑海区底质基础的工程特性, 因此将“底质荷载、淤泥层厚度、海底坡度”划分在工程环境。物理环境因素的设定主要考虑满足鱼类等海洋生物生存的环境条件, 因此将“水深、水流、底质类型”划分在物理环境。化学环境因素的设定主要考虑影响礁区生物生长质量的环境条件, 因此将“水质、沉积物质量、赤潮”划分在化学环境。生物环境因素的设定主要考虑与礁区生物种类、生物量相关的环境条件, 因此将“浮游植物、浮游动物、底栖生物”划分在生物环境。本研究基于 AHP 原理建立人工鱼礁选址适宜

性评价的层次结构模型, 如图 3 所示, 具体将模型准则层划分为主要准则和从属的次级准则(即评价指标), 分别对应 5 类环境和 13 个环境因素, 以此构建人工鱼礁选址评价指标体系。

本研究依据对人工鱼礁建设影响因素的分析情况, 确定主要准则因素权重, 避免了采用专家打分方法存在的人为主观因素影响。确定主要准则因素权重的过程如下: 在海区功能符合建设条件的情况下, 首先考虑人工鱼礁的工程基础建设要求, 而海区的底质特性与建礁工程基础直接相关, 其决定礁体在投放后的稳定性和使用寿命(王飞等, 2008), 因此工程环境因素相对重要性最高。其次水深、水流、底质类

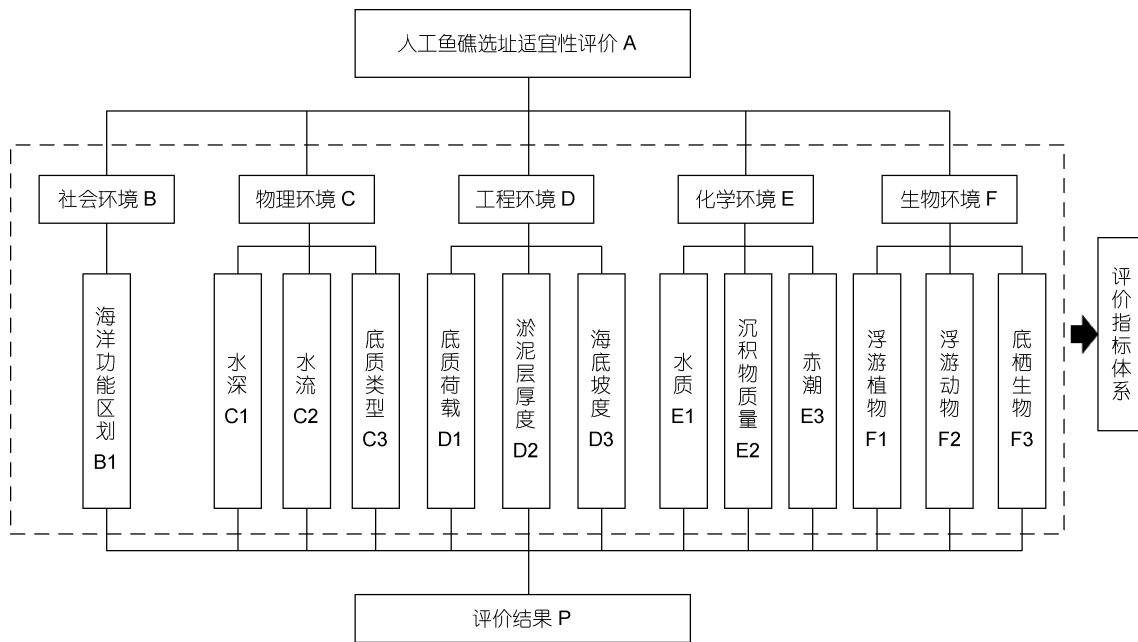


图3 人工鱼礁选址适宜性评价层次结构模型

Fig.3 The hierarchical model of site suitability evaluation for artificial reef

注: A 表示评价目标层, 对应人工鱼礁选址适宜性评价; B、C、D、E、F 分别表示评价准则层中社会环境、物理环境、工程环境、化学环境、生物环境等 5 个主要准则; B1、C1、C2、C3、D1、D2、D3、E1、E2、E3、F1、F2、F3 分别为对应主要准则的次级准则(即评价指标); P 为表示评价方案层, 对应评价结果

型等条件影响着海区底质特性, 因此物理环境因素相对重要性次之。再者考虑的是与养殖目标产品产量和质量相关的生物环境因素和化学环境因素。以此构建主要准则相对于目标层的判断矩阵, 并计算对应权重值(见表 3)。另外, 设定次级准则相对于主要准则的重要性相同。

表 3 主要准则(B、C、D、E、F)对目标层(A)的判断矩阵
Tab. 3 The judgment matrix of the main guideline (B, C, D, E, and F) to the target layer (A)

A	B	C	D	E	F
B	1	1/7	1/9	1/3	1/5
C	7	1	1/2	4	3
D	9	2	1	5	4
E	3	1/4	1/5	1	1/2
F	5	1/3	1/4	2	1

表 3 对应判断矩阵对应一致性指标 $R_c=0.0252 < 0.1$, 表明该判断矩阵一致性较好。最终计算得到主要准则因素权重: 社会环境(0.036 5)、物理环境(0.292 0)、工程环境(0.449 4)、化学环境(0.084 5)、生物环境(0.137 6)。

在评价指标体系构建完成后, 采用指标量化方法对所有指标进行量化处理, 建立相应的定量评价

标准以实现评价结果定量化目标。本研究评价标准建立原则: (1) 优先以国家标准《GB/T 40946-2021 海洋牧场建设技术指南》(国家市场监督管理总局等, 2021) 和行业技术规范《SC/T 9416-2014 人工鱼礁建设技术规范》(中华人民共和国农业部, 2014) 为依据; (2) 针对国家标准和行业技术规范中没有对应量化标准的评价指标, 则参考前人相关研究成果建立标准; (3) 选择针对性的量化方法对不同指标进行归一化处理, 建立相应的定量评价标准。

2.1.1 海洋功能区划 海洋功能区划是海洋牧场建设首要考虑的因素, 原则上功能区具有排他性(Kennish *et al*, 2002), 因此采用二元化法对海洋功能区划指标进行归一化处理。参考“多规合一”下的《国土空间规划的海洋利用分区》标准中划分的 3 个一级功能区 and 12 个二级功能区, 其中 12 个二级功能区包括核心保护区、一般控制区、海水捕捞区、港口航运区、工业与仓储区、矿产与能源区、国防军事区、排污倾倒区、特殊利用区、海洋保留区、海水增养殖区和旅游休闲娱乐区(周鑫等, 2020), 最终将适宜人工鱼礁建设的海水增养殖区和旅游休闲娱乐区对应赋值 1, 其他二级海洋功能区对应赋值 0 (李文涛等, 2003; 冯英明等, 2020)。

2.1.2 底质类型、底质荷载、淤泥层厚度、海底坡度、赤潮、饵料生物 海区的底质特性主要影响礁体稳定性和使用寿命, 部分研究者认为含有泥沙层的硬质底质海区是理想的建礁场所(Turner *et al*, 1969; 贾后磊等, 2009; 周艳波等, 2011)。底质过硬无法固定礁体, 容易发生移位等情况; 底质过软会使礁体下陷甚至被掩埋, 从而影响功能发挥(Mathews, 1981)。已有研究者对适宜人工鱼礁建设的底质类型进行相关分析工作(许妍等, 2016; 李英雪, 2019), 可作为参考依据。从另一角度考虑, 底质类型能够稳固礁体是其承载力的体现, 与之相关的底质荷载等因素也是必要考虑的(徐汉祥等, 2006)。目前有研究者结合建礁实例提出相关量化标准, 表明建礁区的底质荷载一般大于等于 4 t/m^2 , 淤泥层厚度不宜超过 0.6 m (冯英明等, 2020)。人工鱼礁投放一般是具有有一定规模的, 坡度较大的海底地形无法满足鱼礁堆放条件, 易发生整体移位情况(王飞等, 2008), 因此海底坡度也是建礁必要考虑因素, 一般人工鱼礁建设海区的海底坡度应不超过 5° (Barber *et al*, 2009)。

另外, 海洋灾害对于人工鱼礁建设是一个潜在的威胁, 特别是与水质中营养盐相关的赤潮灾害。赤潮发生时伴随水中溶解氧的快速消耗(张朝贤, 2000), 严重影响礁区生物群落衍生和发展。而生物资源状况对礁区生物生存来说同样重要(贾后磊等,

2009), 因此建礁区需要有较丰富的饵料生物来满足目标鱼种的生长发育。

本文参考《海洋调查规范 第 8 部分: 海洋地质地球物理调查》中的“谢帕德”沉积物分类法(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008)与相关研究成果建立底质类型指标的评价标准(表 4)。底质荷载、淤泥层厚度和海底坡度等指标的评价标准如表 5 所示。研究将《HY/T 069-2005 赤潮监测技术规程》(国家海洋局, 2005)中等级划分更为细致的有机污染评价指数 A 作为赤潮指标评价标准建立依据(表 5), 其中水质评价等级中的良好、较好、开始受到污染、轻度污染、中度污染和严重污染分别对应有机污染指数: < 0 、 $0\sim 1$ 、 $1\sim 2$ 、 $2\sim 3$ 、 $3\sim 4$ 、 > 4 等情况。饵料生物相关指标评价标准则依据前人相关研究中饵料生物水平等级划分结果而建立(贾晓平等, 2003), 如表 5 所示。

表 4 底质类型评价标准
Tab.4 The evaluation standards of substrate types

底质类型	赋值
粉砂质粘土、砂质粘土、粘土	0.0
粘土质粉砂、粉砂、砂-粉砂-粘土、粘土质砂	0.2
砂质粉砂	0.5
粉砂质砂	0.8
砂	1.0

表 5 底质荷载、淤泥层厚度、海底坡度、赤潮、饵料生物评价标准
Tab.5 The evaluation standards of seafloor sediment load, silt layer thickness, seafloor slope, red tide, and bait biological stuff (animals or plants)

适宜性区间赋值	底质荷载 /(t/m^2)	淤泥层厚度/m	海底坡度/ $(^\circ)$	赤潮(有机污染 指数)	浮游植物/ $(\times 10^4$ ind./ m^3)	浮游动物 /(mg/m^3)	底栖生物 /(g/m^2)
0.0	0	> 0.6	> 5	< 0	0	0	0
0.2	0~1	0.4~0.6	4~5	0~1	0~50	0~30	0~10
0.4	1~2	0.3~0.4	3~4	1~2	50~75	30~50	10~25
0.6	2~3	0.2~0.3	2~3	2~3	75~100	50~75	25~50
0.8	3~4	0.1~0.2	1~2	3~4	100~200	75~100	50~100
1.0	> 4	0.0~0.1	0~1	> 4	> 200	> 100	> 100

2.1.3 水深、水流、水质、沉积物质量 对于人工鱼礁投放海域水深范围的选择, 水深较小, 礁体会受到海面风浪影响, 发生滑移甚至侧翻等情况(Branden *et al*, 1994), 考虑到风浪的冲击影响, 人工鱼礁一般都投放在较深海域, 再结合光照条件对礁区海洋生物生长状态影响的考虑(李文涛等, 2003; 赵海涛等, 2006), 投放水深应保持在一定适宜范围内。另外也有部分研究者认为需要结合生物分布、

鱼礁类型和礁区生物资源状况以及礁区后期维护等方面决定水深条件(张怀慧等, 2001; 徐汉祥等, 2006; 贾后磊等, 2009)。随着人工鱼礁建设目标的拓展, 在 2014 年颁布并实施的《SC/T 9416-2014 人工鱼礁建设技术规范》(中华人民共和国农业部, 2014)规范性地提出礁区水深要求, 其中以增殖为目标的鱼礁投放适宜水深在 $25\sim 30 \text{ m}$, 其他类型鱼礁投放水深在 100 m 以内即可, 以 $10\sim 60 \text{ m}$ 最适宜。冯英明等(2020)

也表明不同类型鱼礁投放的水深范围有所差异, 休闲礁和浅海的海珍品增殖礁一般在 10~20 m 为宜, 鱼类游钓增殖礁一般在 20~30 m 为宜, 水深最好不低于 5 m。

人工鱼礁产生的流场效应对于提高礁区生态环境质量具有重要意义。适宜流速的海流面向礁体时不仅会在接触面形成局部上升流, 将底部营养物质传递到礁体的各个区域加快巩固礁区生物基础(李东等, 2019), 也会在礁体背部形成涡流, 吸引更多洄游性鱼类, 提高生物多样性(Bleckmann, 1986)。研究者们一般认为礁区适宜水流速度不宜超过 0.8 m/s (Chang, 1985; 赵海涛等, 2006)。

人工鱼礁投放的最初目的就是改善渔业资源状况, 因此与之密切相关的水质和沉积物质量也是必要考虑因素。依据《SC/T 9416-2014 人工鱼礁建设技术规范》(中华人民共和国农业部, 2014)的规定, 水质

按《GB 11607-89 渔业水质标准》(国家环境保护局, 1990)以及《GB 3097-1997 海水水质标准》(国家环境保护局, 2004)中不劣于二类水体的要求, 沉积物质量按《GB 18668-2002 海洋沉积物质量标准》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2004)中不劣于一类水体的要求。本研究采用隶属度函数法建立水深、水流、水质和沉积物质量的评价标准。隶属度函数应用情况为: (1) 人工鱼礁建设所需水深、水流、pH 值适宜性分布特征表现为有效范围内中间适宜性最高, 到两边逐渐降低, 因此选用通用隶属度函数, 如表 6 所示。(2) 国家标准中溶解氧含量增加, 适宜性升高, 因此选用 S 型隶属度函数, 根据国家标准中一、二类海水标准建立相应评价标准, 如表 7 所示。(3) 国家标准中重金属、石油类等参数数值越小越安全, 因此采用 Z 型隶属度函数, 如表 7 所示。函数对应公式如表 6、表 7 所示。

表 6 水深、水流、pH 值对应评价标准
Tab.6 The evaluation standards of water depth, current, and pH

评价指标	隶属度函数公式	a	b	c	d	K ₁	K ₂
水深/m	$L = \begin{cases} 0 & X < a, X > d \\ \left(\frac{X-a}{b-a}\right)^{K_1} & a \leq X < b \\ 1 & b \leq X \leq c \\ \left(\frac{d-X}{d-c}\right)^{K_2} & c < X \leq d \end{cases}$	5	10	30	60	0.57	3.97
水流/(m/s)		0.2	0.4	0.6	0.8	1.32	1.74
pH 值		6.8	7.8	8.5	8.8	0.75	1.26

注: L 为指标参数值的隶属度, K、K₁、K₂ 为特征参数, X 为指标参数值; a, b, c, d 为函数阈值控制点

表 7 水质指标中其他参数和沉积物质量指标参数评价标准

Tab.7 The evaluation standards of other parameters in water quality criterion and the parameters in sediment quality criterion

评价指标	参数名称	隶属度函数公式	a	b	K
水质/(mg/L)	溶解氧	$L = \begin{cases} 0 & X < a \\ \left(\frac{X-a}{b-a}\right)^K & a \leq X \leq b \\ 1 & X > b \end{cases}$	5	6	1
	化学需氧量		2	3	
	生化需氧量		1	3	
	阴离子表面活性剂(以 LAS 计)		0.03	0.10	
	马拉硫磷		0.000 5	0.001 0	
	甲基对硫磷		0.000 5	0.001 0	
	硫化物(以 S 计)	$L = \begin{cases} 1 & X < a \\ \left(\frac{b-X}{b-a}\right)^K & a \leq X \leq b \\ 0 & X > b \end{cases}$	0.02	0.05	1.3
	无机氮		0.2	0.3	
	活性磷酸盐		0.015	0.030	
	滴滴涕($\times 10^{-6}$)		0.000 05	0.000 10	
	六六六($\times 10^{-6}$)		0.001	0.002	
	铅		0.001	0.005	

续表

评价指标	参数名称	隶属度函数公式	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>K</i>	
水质/(mg/L)	六价铬		0.005	0.010		
	总铬		0.05	0.10		
	镉		0.001	0.005		
	汞		0.000 05	0.000 20		
	砷		0.02	0.03		
	镍		0.005	0.010		
	锌		0.02	0.05		
	铜		0.005	0.010		
	硒		0.01	0.02		
	氰化物		0.002 5	0.005 0		
	石油类($\times 10^{-6}$)		0.025	0.050		
	挥发性酚		0.002 5	0.050		
	非离子氨(以 N 计)		0.01	0.02		
	苯并(a)芘($\mu\text{g/L}$)		0.001 25	0.002 50		
	放射性核素(Bq/L)	^{60}Co		0.015	0.030	
		^{90}Sr		2	4	
		^{106}Rn		0.1	0.2	
^{134}Cs			0.3	0.6		
^{137}Cs			0.35	0.70		
沉积物质量 /($\mu\text{g}/\text{mg}$)	有机碳($\times 10^{-6}$)		1	2		
	硫化物($\times 10^{-6}$)		150	300		
	石油类($\times 10^{-6}$)	$L = \begin{cases} 1 & X < a \\ \left(\frac{b-X}{b-a}\right)^K & a \leq X \leq b \\ 0 & X > b \end{cases}$	250	500	1.3	
	六六六($\times 10^{-6}$)		0.25	0.50		
	滴滴涕($\times 10^{-6}$)		0.01	0.02		
	多氯联苯($\times 10^{-6}$)		0.01	0.02		
	铅		30	60		
	铬	40	80			
	镉	0.25	0.50			
	汞	0.1	0.2	1.3		
	砷	10	20			
	锌	75	150			
铜	17.5	35.0				

注: 阴离子表面活性剂(以 LAS 计)中 LAS 为 Linear Alkylbenzene Sulfonates, 直链烷基苯磺酸钠; 硫化物(以 S 计)表示以硫的含量计; 非离子氨(以 N 计)表示以氮的含量计; 其他化学元素也均以对应元素含量计; *a*, *b* 为函数阈值控制点

2.2 评价适宜性等级划分

为更准确体现拟选海区的适宜程度, 本研究参考前人关于适宜性等级划分的研究结果(李英雪, 2019), 将 1, 0.2 分别作为评价结果(*S*)上、下限值, 并均等划分 5 个适宜性等级: 0.0~0.2, 0.2~0.4, 0.4~0.6, 0.6~0.8, 0.8~1.0, 这 5 个适宜性区间对应的适宜程度等级分别为不适宜、较不适宜、基本适宜、比较适宜和完全适宜。

2.3 评价结果计算

为使评价更具全面性, 本研究考虑人工鱼礁的

渔业资源增殖效应, 针对评价标准中零值对结果的直接否定的情况和多参数指标的设定情况, 设置对这两类特殊情况的评价判定过程。其一, 将评价中任意指标参数值出现超限的情况判定为不适宜人工鱼礁建设情况。其二, 由于水质和沉积物质量中重金属、石油类等参数超标对养殖目标和人体具有危害性, 即使接近超限的状态也有潜在风险, 因此研究将水质和沉积物质量中多个参数接近超限的情况也判定为不适宜人工鱼礁建设情况, 并针对该情况设立一

个多参数综合指标 M , 其计算公式为式(4), 将“ $(\sum_{i=1}^n X_i/Y_i)/n$ ”与 M 进行比较, 数值大于 M 的情况判定为不适宜。研究中指标参数值 X_i 与阈值 Y_i 的比值大于 0.5 为接近超限情况, X_i 为指标参数值, Y_i 为评价标准中的 b 值。

$$M = \frac{1+0.5(n-1)}{n}, \quad (4)$$

式中, n 为参数个数。物理意义: 当一个指标参数值 X_i 与阈值 Y_i 的比值接近 1, 其他参数对应比值小于 0.5 的最高限值。两种特殊情况判定结束后, 通过加权线性组合计算评价结果 S , 即适宜性评价, 公式为式(5)。

$$S = \sum W_i S_i, \quad (5)$$

式中, S_i 为主要准则 i 的归一化值, W_i 为主要准则 i 的权重值。计算步骤为: (1)计算评价指标归一化值, 即次级准则因素归一化值; (2)计算 5 个主要准则因素的归一化值(分别设定为 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5)。为保证评价的客观性, 本文将主要准则因素归一化值设定为各自对应次级准则因素归一化值均值。水质和沉积物质量指标归一化值设定为所含参数归一化值均值。

2.4 评价系统创建

由于评价涉及指标、参数较多(输入 55 个, 输出 56 个), 因此研究使用 Python 编程语言创建评价系统计算结果。系统对应设定 5 个模块并针对性地设计三级循环计算步骤, 前两级循环对应两类特殊情况的评价判定过程, 判定结果为不适宜时, 系统输出“round1, 不适宜”或“round2, 不适宜”。三级循环直接

计算适宜性评价, 并输出对应适宜性等级。为方便指标参数值输入, 将海洋功能区划和底质类型指标名称转化为数字编号形式, 前者对核心保护区、一般控制区、海水捕捞区、港口航运区、工业与仓储区、矿产与能源区、国防军事区、排污倾倒区、特殊利用区、海洋保留区、海水增殖区和旅游休闲娱乐区进行 1~12 编号, 编号 11、12 赋值 1; 后者进行 1~5 编号, 依次对应赋值 1.0、0.8、0.5、0.2、0.0 的情况。

3 方法验证

为验证本文构建的评价方法的科学性, 参考已有的人工鱼礁建设相关海洋环境调查实际情况, 采用冯英明等(2020)在山东省日照市两城镇东南侧海域和涛雒镇东侧海域的海洋牧场示范区中适宜人工鱼礁建设海域实际调查数据, 模拟 8 个海区案例进行相关评价分析工作。

3.1 案例设定

本研究表 8 中案例 1~7 为模拟设定案例。案例 8 为实际案例, 主要采用 2020 年在日照市海洋牧场示范区适宜人工鱼礁建设区域的海洋调查数据(冯英明等, 2020), 但该调查数据中用于选址评价的要素不全面, 水质、沉积物质量和饵料生物水平仅说明符合人工鱼礁建设技术规范, 因此本文依据相关国家标准将评价标准中的 b 值(表 6~7)作为缺失数据的代用值, 以保证评价结果的客观性。案例 1~7 中的数据参考该文献研究中的实际调查数据, 结合对两类特殊情况和关注的环境因素针对性地设定相关指标参数值。

表 8 案例指标参数值
Tab.8 The criteria values and parameters values in the study cases

指标和参数名称	案例 1	案例 2	案例 3	案例 4	案例 5	案例 6	案例 7	案例 8	
海洋功能区划	11	7	12	11	11	12	11	11	
水深/m	20	19	18	17	16	15	15	15	
水流/(m/s)	0.6	0.5	0.4	0.3	0.5	0.4	0.3	0.4	
底质类型	1	1	5	1	1	1	1	1	
底质荷载/(t/m ²)	5	4	5	4	5	4	5	6	
淤泥层厚度/m	0.4	0.5	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	
海底坡度/(°)	1	2	3	6	4	3	4	5	
pH 值	7.7	7.8	7.9	8.0	8.3	8.2	8.3	8.0	
水质 (/mg/L)	化学需氧量	2.1	2.3	2.2	2.4	2.3	2.0	1.8	1.5
	生化需氧量	2.2	2.6	2.4	2.5	2.0	2.0	1.8	1.5
	阴离子表面活性剂	0.05	0.05	0.06	0.04	0.03	0.04	0.03	0.05
	马拉硫磷	0.000 6	0.000 5	0.000 7	0.000 6	0.000 4	0.000 5	0.000 4	0.000 5

续表

指标和参数名称	案例 1	案例 2	案例 3	案例 4	案例 5	案例 6	案例 7	案例 8		
水质 (mg/L)	甲基对硫磷	0.000 4	0.000 5	0.000 4	0.000 5	0.000 3	0.000 5	0.000 4	0.000 5	
	硫化物	0.015	0.020	0.018	0.027	0.025	0.030	0.020	0.025	
	无机氮	0.18	0.22	0.21	0.2	0.25	0.15	0.20	0.15	
	活性磷酸盐	0.012	0.016	0.014	0.018	0.027	0.020	0.012	0.015	
	滴滴涕($\times 10^{-6}$)	0.000 06	0.000 06	0.000 07	0.000 05	0.000 06	0.000 05	0.000 04	0.000 05	
	六六六($\times 10^{-6}$)	0.001 2	0.001 4	0.001 3	0.001 0	0.001 2	0.001 0	0.001 2	0.001 0	
	铅	0.000 5	0.000 8	0.000 6	0.000 9	0.001 5	0.002 0	0.001 5	0.002 5	
	六价铬	0.005	0.006	0.005	0.006	0.006	0.004	0.005	0.005	
	总铬	0.02	0.04	0.03	0.05	0.06	0.05	0.04	0.05	
	镉	0.002 0	0.003 0	0.002 5	0.002 8	0.003 2	0.002 0	0.003 0	0.002 5	
	汞	0.000 04	0.000 06	0.000 05	0.000 07	0.000 08	0.000 05	0.000 08	0.000 10	
	砷	0.015	0.019	0.017	0.021	0.022	0.028	0.020	0.015	
	镍	0.004	0.005	0.004	0.005	0.004	0.009	0.004	0.005	
	锌	0.015	0.021	0.018	0.024	0.024	0.045	0.020	0.025	
	铜	0.004	0.005	0.004	0.005	0.006	0.008	0.005	0.005	
	硒	0.009	0.012	0.010	0.011	0.012	0.018	0.008	0.010	
	氰化物	0.002 0	0.003 0	0.002 0	0.002 5	0.003 0	0.002 0	0.003 0	0.002 5	
	石油类($\times 10^{-6}$)	0.025	0.030	0.020	0.025	0.030	0.025	0.020	0.025	
	挥发性酚	0.002 5	0.002 8	0.002 0	0.003 2	0.003 0	0.002 0	0.001 5	0.002 5	
	非离子氨	0.012	0.013	0.012	0.013	0.014	0.010	0.015	0.010	
	苯并(a)芘($\mu\text{g/L}$)	0.001 20	0.001 30	0.001 25	0.001 40	0.001 50	0.001 20	0.001 30	0.001 25	
	放射性核 素(Bq/L)	^{60}Co	0.015	0.018	0.012	0.016	0.017	0.016	0.010	0.015
		^{90}Sr	2.2	2.1	2.0	2.6	2.5	2.4	1.8	2.0
^{106}Rn		0.09	0.11	0.10	0.12	0.12	0.10	0.05	0.10	
^{134}Cs		0.30	0.40	0.25	0.35	0.30	0.25	0.20	0.30	
^{137}Cs		0.030	0.040	0.035	0.040	0.030	0.025	0.035	0.350	
溶解氧	7.0	5.7	5.8	5.9	5.3	6.0	6.5	6.0		
沉积物质量 ($\mu\text{g/mg}$)	有机碳($\times 10^{-6}$)	0.8	1.2	1.0	1.4	1.1	0.8	0.9	1.0	
	硫化物($\times 10^{-6}$)	150	200	175	125	190	200	180	150	
	石油类($\times 10^{-6}$)	200	220	250	350	300	220	200	250	
	六六六($\times 10^{-6}$)	0.25	0.30	0.20	0.40	0.35	0.30	0.20	0.25	
	滴滴涕($\times 10^{-6}$)	0.005	0.012	0.008	0.014	0.009	0.008	0.005	0.010	
	多氯联苯($\times 10^{-6}$)	0.005	0.004	0.012	0.009	0.008	0.005	0.009	0.010	
	铅	25	35	30	45	40	35	20	30	
	铬	45	45	30	50	42	35	45	40	
	镉	0.30	0.25	0.30	0.35	0.35	0.30	0.48	0.25	
	汞	0.05	0.06	0.10	0.08	0.10	0.12	0.18	0.10	
	砷	5	15	10	13	12	10	18	10	
	铜	50	60	80	85	80	90	140	75	
浮游植物/($\times 10^4$ ind/ m^3)	185	300	300	80	300	200	280	250		
浮游动物/(mg/ m^3)	200	50	80	200	155	150	180	200		
底栖生物/(g/ m^2)	150	60	70	80	90	100	100	150		

注: 表格对各指标(包含水质、沉积物质量中的参数)进行编号, 从海洋功能区划到底栖生物指标依次编号 1~55; 其中海洋功能区划与底质类型指标对应数值为相应的数字编号

3.2 结果与讨论

案例 1 模拟指标参数值均未超限, 评价结果输出为“0.838 3, 完全适宜”; 案例 4 模拟随机指标参数值超限, 以海底坡度(编号 7)为例, 评价结果输出为“round1, 不适宜”。案例 1 和案例 4 用于验证建立的评价标准合理性和有效性, 当任意指标参数值不超限能够获取“适宜”评价结果或当任意单一指标参数值超限能够获取“不适宜”评价结果。

案例 2、案例 3 分别模拟海洋功能区(编号 1)和底质类型(编号 4)不适宜的情况。案例 2 中海洋功能区划指标对应输入编号 7, 代表案例 2 海区场景的海洋利用分区是“国防军事区”, 不能建设人工鱼礁, 指标归一化值为 0; 案例 3 中底质类型指标对应输入编号 5, 代表案例 3 海区场景的底质类型是粉砂质粘土、砂质粘土和粘土中的一种, 指标归一化值也为 0。案例评价结果均输出为“round1, 不适宜”, 一方面展现指标超限对人工鱼礁建设方案的否定作用, 另一方面也验证了研究针对这两个指标数字编号是可用的。

案例 5 模拟赤潮指标(编号 53)超限, 考虑到赤潮指标归一化值由相关的化学需氧量、无机氮、无机磷、溶解氧指标参数值计算所得(本文中无机磷主要为活性磷酸盐, 编号分别为 9、15、16、39)。为单纯验证赤潮指标超限情况, 案例中与赤潮相关的 4 个指标参数值均未出现超限的情况, 经计算得到赤潮指标归一化值为 0, 评价结果输出为“round1, 不适宜”。

案例 6 和案例 7 分别模拟水质、沉积物质量指标中多个参数值接近超限的情况。案例 6 模拟水质中砷、镍、锌、铜、硒(编号分别为 24、25、26、27、28)等参数值接近超限的情况; 案例 7 模拟沉积物质量中镉、汞、砷、锌、铜(编号分别为 48、49、50、51、52)等参数值接近超限的情况。案例评价结果均输出为“round2, 不适宜”。案例 6 与案例 7 用于验证本研究多参数指标设定以及对应的第二类特殊情况评价判定的可行性, 结果表明多参数综合指标 M 设定能够合理排除水质、沉积物质量中多个参数值接近超限而出现产品质量问题等情况。

案例 8 评价结果输出为“0.727 6, 比较适宜”。冯英明等(2020)在山东省日照市北部的两城镇东南侧海域和南部的涛雒镇东侧海域对 12 个海洋牧场示范区中适宜建设人工鱼礁海域评价分析结果包括: (1) 海域水深适宜, 底质类型以粉质砂、中粗砂等为主; 坡度较小, 地势平缓; 淤泥层厚度较小, 海底的承载能力适宜鱼礁建设。(2) 水流速度也有利于礁体的固定,

符合人工鱼礁投放和施工条件。(3) 水质清洁, 饵料生物丰富, 适宜海洋生物生长。海域环境的整体评价结果表明该海域符合人工鱼礁建设条件, 适宜程度比较高。2020 年日照市沿海人工鱼礁选址适宜性评价结果与本研究案例 8 的分析结果基本吻合。

在实际情况中经常会出现具有不同环境条件的海区场景, 相应地用于评价分析的调查参数可能存在一定的不确定性。因为案例要有一定的代表性, 针对前述两类特殊情况以及其他可能出现的具有代表性特征的海区场景, 分别设置这 8 个待验证案例的海洋环境参数值。案例分析结果显示: (1) 当任意单一指标归一化值出现零值时, 如出现类似案例 2 对应海区其他功能设定、案例 3 对应底质类型不适宜鱼礁建设、案例 4 对应其他指标值超出标准限值等情况时, 其评价结果均输出为“round1, 不适宜”; (2) 当任意单一指标归一化值未出现零值而出现多参数指标中多个参数值接近超限的情况时, 同样认为对应目标方案是不适宜的; 如案例 6、7 分别对应水质、沉积物质量的指标中出现多个参数值接近超限的情况, 当判定值超过多参数综合指标 M, 则评价结果输出均为“round2, 不适宜”; (3) 当所有环境指标参数值均未出现超限并且也未出现多参数指标中多个参数值接近超限的情况时, 评价结果输出为海区适宜性评价值和对应的适宜等级。图 4 为案例指标参数归一化值的热点分布图, 清晰展示导致案例评价结果为“round1, 不适宜”或“round2, 不适宜”的异常值分布情况。通过对模拟设定案例与实际海区案例的评价分析, 证明本研究提出的评价方法适用于人工鱼礁选址评价工作, 所创建的评价系统软件能够快速、有效计算评价结果。

4 结论

本研究基于 AHP 原理, 提出一种适用于人工鱼礁选址的适宜性评价分析方法, 方法创新性主要包括: (1) 结合对不同类型人工鱼礁选址影响因素的考虑, 构建较为完善的人工鱼礁选址评价指标体系, 包括 5 大类环境和相应从属的 13 个环境因素, 具有较好的通用性。其中多参数指标设定使得评价分析更为全面。(2) 多种指标量化方法的应用指标使量化过程更具针对性, 同时实现评价指标完全定量化目标。(3) 根据人工鱼礁建设涉及的多学科研究结果和对人工鱼礁建设影响因素的实际分析, 确定 5 个主要准则因素权重, 避免采用专家打分方法存在的主观

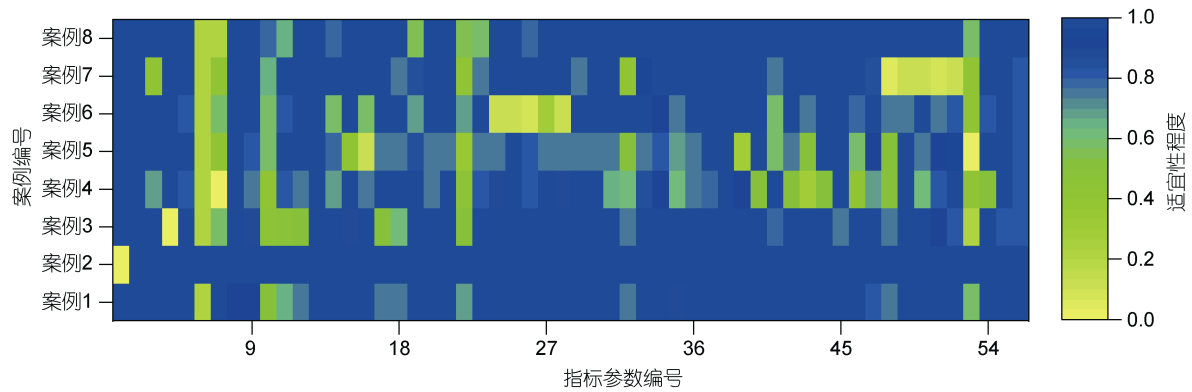


图4 案例中指标参数归一化值的热点分布图

Fig.4 Hotspot distribution diagram of normalized values of criterion parameters in the study cases

注: 适宜性程度黄色代表最不宜, 蓝色代表最适宜; 参数编号与表8中的序号对应, 其中编号53代表赤潮指标归一化值, 编号54、55、56代表饵料生物指标归一化值

性和标准不一致等问题, 保证评价结果的客观性和可比较性。(4) 基于对人工鱼礁渔业资源增殖效应的考虑所设置的两类特殊情况的评价判定过程, 有效排除不适宜人工鱼礁建设海区, 使评价方法更具科学性。(5) 使用 Python 编程语言创建评价系统计算适宜性评价价值并同步输出对应适宜性等级, 结果呈现形式简洁明了。该方法不仅在进行多个海区方案建礁适宜性的比较分析时具有评价效率高、准确度高等优势, 也可为广泛开展各种类型的人工鱼礁选址评价应用提供客观、定量分析方法。

参 考 文 献

- 王飞, 张硕, 丁天明, 2008. 舟山海域人工鱼礁选址基于 AHP 的权重因子评价[J]. 海洋学研究, 26(1): 65-71.
- 中华人民共和国农业部, 2014. 人工鱼礁建设技术规范: SC/T 9416-2014[S]. 北京: 中国农业出版社.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2004. 海洋沉积物质量: GB 18668-2002[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008. 海洋调查规范 第 8 部分: 海洋地质地球物理调查: GB/T 12763.8-2007[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 尹增强, 章守宇, 2012. 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, 34(1): 23-31.
- 冯英明, 许丙彩, 郝义, 等, 2020. 日照市海洋牧场示范区人工鱼礁选址适宜性分析[J]. 山东国土资源, 36(1): 44-50.
- 许妍, 鲍晨光, 梁斌, 等, 2016. 天津市近海海域人工鱼礁选址适宜性评价[J]. 海洋环境科学, 35(6): 846-852, 867.
- 许强, 2012. 海洋牧场选址问题的研究——以舟山市为例[D]. 上海: 上海海洋大学.
- 许强, 章守宇, 2013. 基于层次分析法的舟山市海洋牧场选址评价[J]. 上海海洋大学学报, 22(1): 128-133.
- 李文涛, 张秀梅, 2003. 关于人工鱼礁礁址选择的探讨[J]. 现代渔业信息(5): 3-6.
- 李东, 侯西勇, 唐诚, 等, 2019. 人工鱼礁研究现状及未来展望[J]. 海洋科学, 43(4): 81-87.
- 李英雪, 2019. 基于 AHP 的江苏省如东县人工鱼礁选址生态适宜性评价[D]. 上海: 上海海洋大学.
- 杨吝, 刘同渝, 黄汝堪, 2005. 人工鱼礁的起源和历史[J]. 现代渔业信息(12): 5-8.
- 佟飞, 秦传新, 余景, 等, 2016. 粤东柘林湾溜牛人工鱼礁建设选址生态基础评价[J]. 南方水产科学, 12(6): 25-32.
- 张吉军, 2000. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 14(2): 80-88.
- 张怀慧, 孙龙, 2001. 利用人工鱼礁工程增殖海洋水产资源的研究[J]. 资源科学, 23(5): 6-10.
- 张朝贤, 2000. 赤潮的危害和预测预报[J]. 海岸工程, 19(2): 86-89.
- 陈丕茂, 舒黎明, 袁华荣, 等, 2019. 国内外海洋牧场发展历程与定义分类概述[J]. 水产学报, 43(9): 1851-1869.
- 陈勇, 2020. 中国现代化海洋牧场研究与建设[J]. 大连海洋大学学报, 35(2): 147-154.
- 国家市场监督管理总局, 国家标准化委员会, 2021. 海洋牧场建设技术指南: GB/T 40946-2021[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 国家环境保护局, 1990. 渔业水质标准: GB 11607-1989[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 国家环境保护局, 2004. 海水水质标准: GB 3097-1997[S]. 北京: 环境科学出版社.
- 国家海洋局, 2005. 赤潮监测技术规程: HY/T 069-2005[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 周艳波, 陈丕茂, 李辉权, 2011. 广东省柘林湾海域溜牛礁区建礁可行性研究[J]. 广东农业科学, 38(23): 10-14.
- 周鑫, 陈培雄, 黄杰, 等, 2020. 国土空间规划的海洋分区研究[J]. 海洋通报, 39(4): 408-415.
- 单晨枫, 刘敏, 马成龙, 等, 2022. 基于 MCDM 的大长山岛海域增殖型海洋牧场人工鱼礁选址适宜性评价[J]. 安徽农学通报, 28(7): 88-93.
- 赵海涛, 张亦飞, 郝春玲, 等, 2006. 人工鱼礁的投放区选址和礁体设计[J]. 海洋学研究, 24(4): 69-76.
- 贾后磊, 谢健, 彭昆仑, 2009. 人工鱼礁选址合理性分析[J]. 海洋开发与管理, 26(4): 72-75.
- 贾晓平, 杜飞雁, 林钦, 等, 2003. 海洋渔场生态环境质量状况综合评价方法探讨[J]. 中国水产科学, 10(2): 160-164.

- 徐汉祥, 王伟定, 金海卫, 等, 2006. 浙江沿岸休闲生态型人工鱼礁初选点的环境适宜性分析[J]. 海洋渔业, 28(4): 278-284.
- 曾旭, 章守宇, 林军, 等, 2018. 岛礁海域保护型人工鱼礁选址适宜性评价[J]. 水产学报, 42(5): 673-683.
- 温泽民, 2014. 大长山海洋牧场拟建海域生态环境评价研究[D]. 大连: 大连海洋大学.
- 虞聪达, 2004. 舟山渔场人工鱼礁投放海域生态环境前期评估[J]. 水产学报, 28(3): 316-322.
- BAINE M, 2001. Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance [J]. *Ocean & Coastal Management*, 44(3/4): 241-259.
- BARBER J S, CHOSID D M, GLENN R P, *et al*, 2009. A systematic model for artificial reef site selection [J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 43(1): 283-297.
- BLECKMANN H, 1986. Role of the lateral line in fish behaviour [M] // PITCHER T J. *The Behaviour of Teleost Fishes*. New York: Springer: 177-202.
- BRANDEN K L, POLLARD D A, REIMERS H A, 1994. A review of recent artificial reef developments in Australia [J]. *Bulletin of Marine Science*, 55(2/3): 982-994.
- CHANG K H, 1985. Review of artificial reefs in Taiwan: emphasizing site selection and effectiveness [J]. *Bulletin of Marine Science*, 37(1): 143-150.
- TURNER C H, EBERT E E, GIVEN R R, 1969. Man-Made Reef Ecology [M]. California Department of Fish and Game. California Digital Library, University of California.
- JHA D K, PANDEY V, SANTHANAKUMAR J, *et al*, 2022. Evaluation of site suitability for artificial reefs deployment in southeast coast of India using geographical information system as a management tool [J]. *Frontiers in Marine Science*, 8: 817975.
- KENNISH R, WILSON K D P, LO J, *et al*, 2002. Selecting sites for large-scale deployment of artificial reefs in Hong Kong: constraint mapping and prioritization techniques [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 59(S1): S164-S170.
- KIM B K, HWANG D H, YOON H J, *et al*, 2015. A study on suitability selection of artificial reef by GIS [J]. *The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, 10(5): 629-636.
- MATHEWS H, 1981. Artificial reefs site: selection and evaluation [C] // *Artificial Reefs: Conference Proceedings*. NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. Florida Sea Grant Report: 50-54.
- MOUSAVI S H, DANEHKAR A, SHOKRI M R, *et al*, 2015. Site selection for artificial reefs using a new combine multi-criteria decision-making (MCDM) tools for coral reefs in the Kish Island-Persian Gulf [J]. *Ocean & Coastal Management*, 111: 92-102.
- RAMANATHAN R, 2001. A note on the use of the analytic hierarchy process for environmental impact assessment [J]. *Journal of Environmental Management*, 63(1): 27-35.
- SAATY T L, 1972. An eigenvalue allocation model for prioritization and planning [D]. Philadelphia: Energy Management and Policy Center, University of Pennsylvania: 28-31.
- SAATY T L, 2000. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory: with the Analytic Hierarchy Process* [M]. Pittsburgh, PA, RWS Publications: Analytic Hierarchy Process Series, vol. 6.
- TSENG C T, CHEN S C, HUANG C S, *et al*, 2001. GIS-assisted site selection for artificial reefs [J]. *Fisheries Science*, 67(6): 1015-1022.
- XU X, WANG N, ZHU Y X, *et al*, 2019. Research on comparison of artificial alga reef site selection scheme in Beidaihe Sea Area [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 281(1): 012021.

EVALUATION METHOD FOR SITE SELECTION SUITABILITY OF ARTIFICIAL REEF AREAS BASED ON ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

ZHANG Zi-Niu^{1,2}, WANG Zhen-Yan^{1,2,3,4}, LI Gui-Hua¹, ZHAO Mei-Han^{2,4}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266037, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract As an effective means to increase fishery resources, artificial reefs play an important role in the construction of marine ranching, to which the scientific site selection is the first technical issue to be solved. At present, there is no universal quantitative evaluation method for the site selection of artificial reefs. We built a hierarchical structure model based on the analytic hierarchy process (AHP), in which indices of social, physical, engineering, chemical, and biological environment are set as main guideline factors; and those of marine functional zonation, water depth, current, substrate type, substrate carrying capacity, silt layer thickness, seafloor slope, water quality, sediment quality, red tide, phytoplankton, zooplankton, and benthic organism are set as sub-guideline factors. The sub-guideline factors were set as evaluation criteria. Water quality and sediment quality were set as multi-parameter criteria. Based on the relevant national and industry technical standards, several normalization methods were used to establish fully-quantitative evaluation standards for evaluation criteria. Combined with the actual analysis of the factors that are considered in the construction of artificial reefs, the weights of the main guideline factors can be quantified. Considering the effect of artificial reefs fishery resource enhancement, the evaluation and determination steps for two types of special cases were set in the evaluation process. The two special cases are: 1) the value of a single environmental parameter exceeds the limit; and 2) the values of several parameters in the multi-parameter criteria is about to exceed the limit. The Python programming language was used to create an evaluation system to efficiently calculate the evaluation values and assign them to a suitability level correspondingly. According to the actual survey data in the marine ranch demonstration zone in Rizhao, Shandong, eight specific cases were set to verify the method. Case analysis shows that the evaluation method proposed in this study had good practicability, which can effectively analyze and obtain the evaluation results of reef construction suitability in the target sea area. Meanwhile, it also can provide a reference for site selection of artificial reef.

Key words marine ranching; artificial reefs; site selection; analytic hierarchy process; evaluation