

文章编号: 1000-0615(2018)05-0673-11

DOI: 10.11964/jfc.20170210714

岛礁海域保护型人工鱼礁选址适宜性评价

曾旭, 章守宇*, 林军*, 钟佳明

(上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 为了提高人工鱼礁选址的有效性, 实验以岛礁海域保护型人工鱼礁选址适宜性评价为例, 基于多准则决策方法, 结合专家系统、层次分析法、地理信息系统(GIS)空间分析对马鞍列岛海域进行了研究。通过文献综述和专家经验提取影响保护型人工鱼礁选址适宜性的主要准则(物理因素、生物因素和管理因素)和对应的次级准则(底部坡度、底质类型、海流、水深; 渔获量、资源密度、幼鱼量、幼鱼扩散; 与污染源距离、与航道距离、离岸距离)。通过两两比较法和层次分析法计算主要准则和次级准则的权重, 结果显示, 物理因素、生物因素和管理因素的权重分别为0.481、0.405、0.114。对应次级准则的权重为0.101、0.186、0.097、0.098、0.095、0.184、0.048、0.079、0.068、0.030、0.016。各准则图层叠加计算后的结果显示, 马鞍列岛保护型人工鱼礁选址的适宜性具有空间异质性; 海区底质类型、水深、资源密度与适宜性分布的对应分析表明, 模型结果与适宜性准则的设置基本一致; 高适宜性区域内已投放的人工鱼礁也表现出有效性。

关键词: 保护型人工鱼礁; 选址适宜性; 多准则决策; 层次分析法; 地理信息系统; 马鞍列岛

中图分类号: S 931.4

文献标志码: A

人工鱼礁(包括鱼类礁、藻类礁和贝类礁)是人工置于海域环境中用于修复和优化水域生态环境的构造物, 它通过适当地制作和放置来增殖和吸引各类海洋生物, 达到改善海域生态环境和恢复渔业资源的目的^[1]。由于过度捕捞和环境污染, 近海生态环境遭受严重破坏, 渔业资源日渐枯竭, 为了修复生态环境和渔业资源, 世界上已有30多个国家和地区在其沿海建设人工鱼礁^[2]。然而根据Baine等^[3]关于基于全球人工鱼礁设计、应用和管理的研究显示, 超过50%的人工鱼礁项目由于选址不当、规划不够、缺乏监督而失败。人工鱼礁的投放需要消耗大量的时间和财力, 使得改变其投放位置几乎不可能, 因此人工鱼礁项目的成败很大一部分依赖于精确的选址^[4-6]。截至2011年, 我国已累计投放人工鱼礁近3200万m³, 大多数针对人工鱼礁的研究集中在其投放后的生态效果评估^[7-8], 尽管这些结

果可评价礁体的有效性, 但对之后的投礁区域选择并未提供必要的参考。

保护型人工鱼礁可通过修复生态环境和防止大型渔具作业, 使拖网、围网和刺网等网渔具避开鱼礁区, 使得鱼礁区成为禁渔区和鱼类避难所, 从而改善海域生态环境, 有效保护海洋生物多样性, 保护和保全濒危珍稀物种^[9]。马鞍列岛位于浙江省舟山群岛东北部, 是舟山渔场的核心部位。该海域受到多种人类活动的影响, 如海岛开发、海水养殖和使用破坏性底拖网捕捞等, 使得该海域内局部生境受到严重干扰。保护和修复马鞍列岛海域种群结构已出现个体小型化趋势^[10-11]的趋礁性经济鱼种的举措之一一是投放保护型人工鱼礁。然而关于保护型人工鱼礁在岛礁海域的选址研究鲜有报道, 因此本实验以此为例, 以期对投礁区域选择提供参考。

国内外针对人工鱼礁选址的研究^[5-6, 12], 通

收稿日期: 2017-02-18 修回日期: 2017-05-18

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303047)

通信作者: 章守宇, E-mail: syzhang@shou.edu.cn; 林军, E-mail: jlin@shou.edu.cn

常使用基于专家经验的排除地图或者层次分析法结合地理信息系统(geographic information system, GIS),且未对选址准则进行解释^[11, 13-14]。选址是一个复杂的基于目标的决策过程,一种基于多准则决策、专家系统、层次分析法和GIS相结合的方法已被众多学者用于珊瑚礁和水产养殖项目的站点选择^[15-19]。该方法对选址准则的选取和权重赋值进行了量化评价,且随着本底调查数据精度的提高可输出更精确的选址适宜性分布图。Mousavi等^[20]使用这种方法对波斯湾的基什岛的人工鱼礁选址进行了研究,取得了良好的效果。本研究参考该方法,采用3个步骤对岛礁海域保护型人工鱼礁选址适宜性进行评价:①由专家经验提取其选址的有效准则;②采用两两比较法计算每个准则的权重;③根据研究区域的本底调查和数值模拟数据,由基于加权线性组合的GIS栅格计算得出最终的适宜性值,并输出研究区域的适宜性分布图。

1 材料与方 法

1.1 研究区域

实验在东海区—马鞍列岛岛礁海域开展(图1)。该区域岛礁众多,为周边的趋礁性鱼类提供了天然的生长场所,有利于保护型人工鱼礁项目的开展。

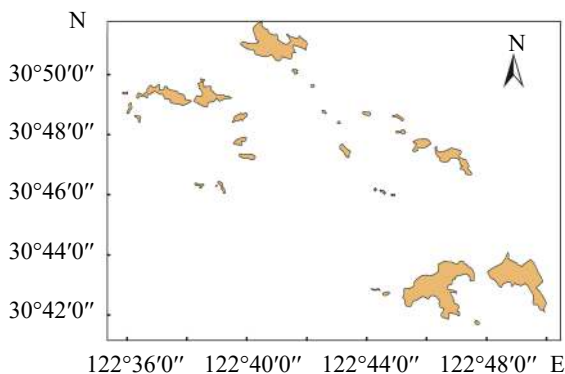


图1 马鞍列岛岛礁海域示意图

Fig. 1 Ma'an Archipelago area

1.2 研究方法

实验选址流程列于图2。

1.3 确定主要准则和次级准则

针对保护型人工鱼礁选址的主要准则和次级准则缺乏相关研究,本实验参考Mousavi等^[21]

的人工鱼礁选址准则并结合国内的人工鱼礁建设准则总结了可能影响保护型人工鱼礁选址的准则(表1)。

本实验以邮件寄送的方式对15位相关专家进行了2轮咨询,确定了主要准则和次级准则。专家的选择基于他们在东海区岛礁、人工鱼礁以及在渔业资源方面的经验和知识。每个专家按照如下规则对选址准则打分:不重要(1),重要性低(3),重要(5),很重要(7),极为重要(9),介于它们中间为(2, 4, 6, 8)。根据专家评分,实验按照以下4个公式计算得出每一个主要准则和次级准则的重要性水平和重要百分比^[16]:

$$a_i = x_i N / \sum x_i \quad (1)$$

$$w_i = a_i * n \quad (2)$$

$$p = \sum \frac{w_i}{A} * 100 \quad (3)$$

$$D = \sum \frac{(x_i * n)}{N} \quad (4)$$

式中, A 示最大获得分数(=135), N 示专家总数(=15), n 示投该重要性分数的人数, x_i 示初始权重, a_i 示调整权重, w_i 示权重分数; p 示准则的重要百分比, D 示准则的重要性水平。当准则的重要性水平和重要百分比大于最大值的80%时,该准则被确定为有效。

1.4 确定选址准则权重

主要准则、次级准则和准则值的相对权重和排序由2个步骤完成:一是专家根据两两比较法构造判断矩阵^[21](1~9标度法);二是由层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)计算准则的权重并评估判断矩阵的一致性比率。为了均衡各个专家的意见,每个准则最终的判断矩阵由每个专家构建的判断矩阵经几何平均计算后得出,最终计算出准则的相对权重。

1.5 建立GIS模型

GIS模型由因素图层和排除图层构建。其中因素图层由以下数据构建:①生物因素数据来自2009年马鞍列岛逐月渔业资源调查;②坡度由GIS中的坡度公式从水深数据的数字高程模型计算得出;③底质类型数据由马鞍列岛底质类型分布图数值化得出;④水深和海流数据由FV-COM数值模型计算得出;⑤管理因素数据由GIS空间分析的欧氏距离生成。排除图层的构建

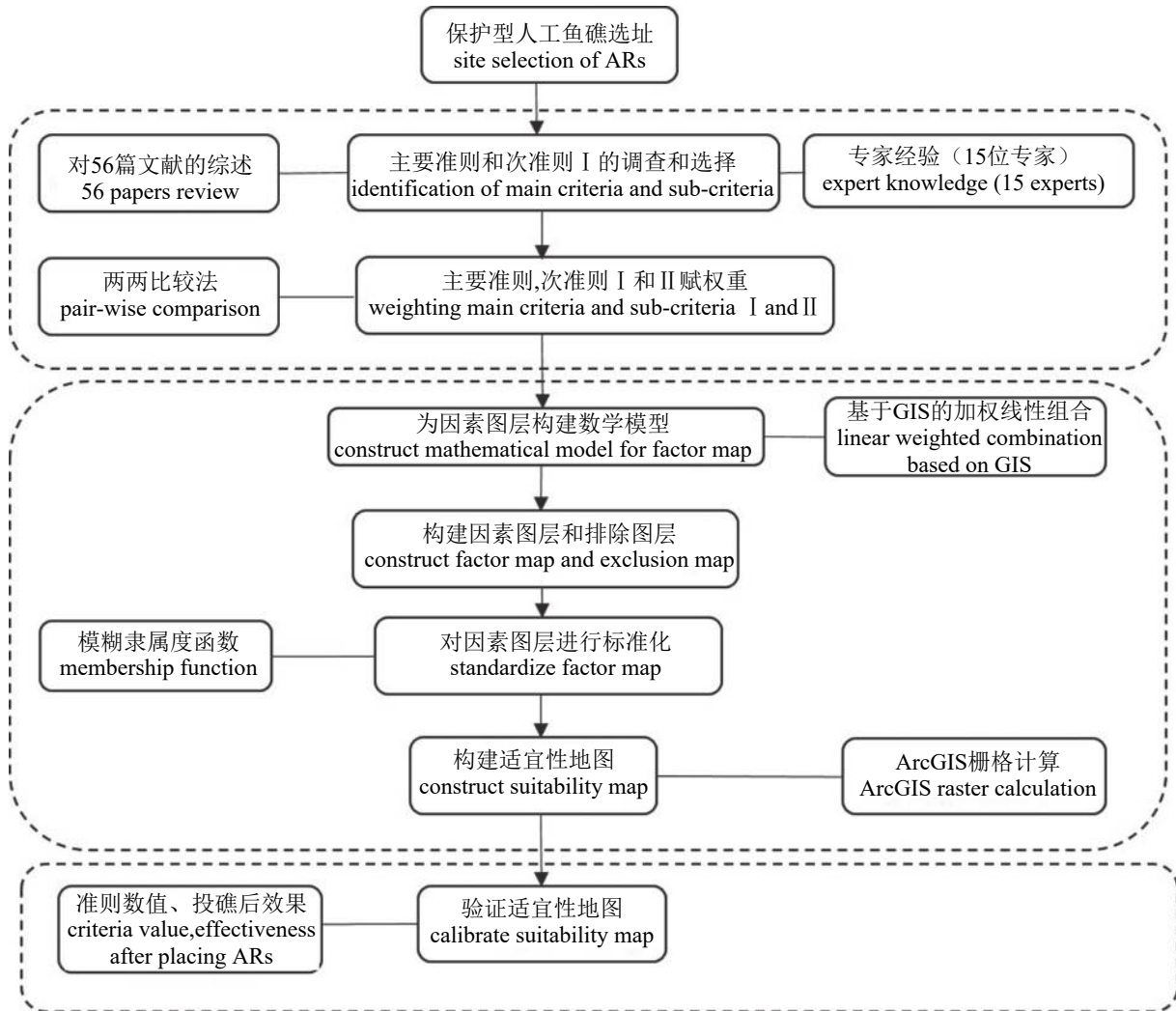


图2 保护型人工鱼礁选址流程

Fig. 2 Protective artificial reefs (ARs) site selection flow

则结合东海区渔业监测区域的海产养殖、渔场、航道以及海域使用规划。

由于构成每个因素图层的数据单位不同, 因此需要通过模糊函数将其进行标准化。本实验采用S型隶属度函数, Z型隶属度函数, 高斯隶属度函数和通用隶属度函数^[16]进行准则值标准化(图3)。在0~1的范围内进行标准化, 0代表适宜性最低, 1代表适宜性最高。表2表明了每个主要准则、次级准则的权重和进行标准化的隶属度函数。

马鞍列岛岛礁海域保护型人工鱼礁投放的适宜性图层构造包含11个因素图层和4个排除图层:

$$SM = FM - EM \quad (5)$$

式中, SM示适宜性图层, FM示因素图层, EM示排除图层。

最终SM的计算基于多准则决策方法中的加

权线性组合。每个区域的适宜性值由以下公式得出:

$$V_i = \sum W_j x_{ij} \quad (6)$$

式中, V_i 示区域*i*的适宜性值。 x_{ij} 示准则*j*在区域*i*中的标准化值, W_j 示准则*j*的相对权重。

2 结果

2.1 准则评估

根据专家问卷, 由公式(1)、(2)、(3)、(4)计算保护型人工鱼礁选址的主要准则评分结果(图4)。所有专家均认为物理因素是最显著有效的准则, 重要性水平值为8.27, 重要百分比为30.62%。其次是生物因素, 重要性水平值为7.73, 重要百分比为28.64%。管理因素重要性水平值为6.74,

表 1 影响保护型人工鱼礁选址的准则

Tab. 1 Criteria which influence the protective artificial reefs site selection

准则编号 criteria number	次级准则 sub-criteria	主要准则 main criteria	准则编号 criteria number	次级准则 sub-criteria	主要准则 main criteria	准则编号 criteria number	次级准则 sub-criteria	主要准则 main criteria
1	现存的海底群落 existing community	生物因素 biological	17	光 light	物理因素 physical	33	目标种与竞争物种间的距离 distance to competitor	物理因素 physical
2	幼鱼扩散 larval dispersal		18	溶解无机物 dissolved inorganic		34	与海水淡化装置的距离 distance to desalination facility	
3	存在自然幼鱼 existing larvae		19	溶解有机物 dissolved organic		35	与自然礁的距离 distance to natural reef	
4	便于管理 benefit for managing	管理因素 management	20	海流 current		36	与石油和天然气平台的距离 distance to oil and gas platform	
5	利益相关者容易接近 easy for manager to access		21	溶解氧 dissolved oxygen		37	与污染源的距离 distance to pollution source	
6	对当地经济的利益 benefit for local economic	社会经济因素 social economic	22	生化需氧量 biochemical oxygen demand		38	与发电设备的距离 distance to power equipment	
7	文化价值 cultural benefit		23	酸碱度 pH		39	与敏感生态系统的距离 distance to sensitive ecosystems	
8	经济优势 economic value		24	盐度 salinity		40	与航道的距离 distance to channel	
9	教育价值 education value		25	潮流 tide		41	与退化区域距离 distance to degraded region	
10	旅游价值 tourism value		26	浊度 turbidity		42	与捕食物种的距离 distance to the predator species	
11	居民的支持水平 residents supportive level		27	水深 depth		43	与海岸线距离 distance to coastline	
12	休闲娱乐价值 entertainment value		28	水温 temperature		44	与拖网路线距离 distance to trawl line	
13	建造、投放以及维护费用 cost for constructing and maintaining		29	波浪 wave		45	与海藻场距离 distance to kelp forest	
14	底部坡度 bottom slope	物理因素 physical	30	风 wind		46	与鱼类定居点距离 distance to fish settlement	
15	底质类型 substrate		31	风暴潮 storm tide		47	与渔场距离 distance to fishing ground	
16	叶绿素 _a Chl. a		32	底质粒径 sedimentary particle size				

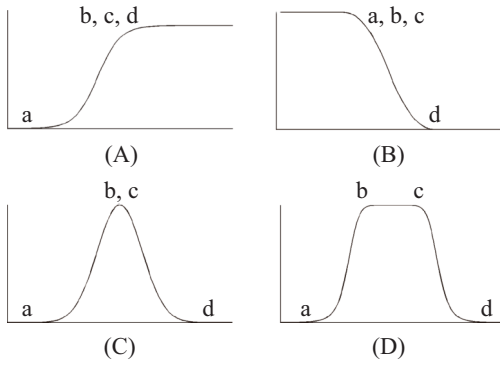


图3 隶属度函数及其控制点a、b、c、d

(A)S型隶属度函数, (B)Z型隶属度函数, (C)高斯隶属度函数, (D)通用隶属度函数

Fig. 3 Membership function and control points a, b, c, d
(A)S membership function, (B)Z membership function, (C)Gauss membership function, (D) general membership function

重要百分比为24.56%。社会经济因素重要性水平和重要百分比值均低于最大值的80.00%(6.62、24.50), 因此本实验未将其作为保护型人工鱼礁选址的主要准则。

次级准则重要性水平和重要百分比的选取标准为大于或等于6.50和24.01。渔获量、资源密度、幼鱼量和幼鱼扩散; 底部坡度、底质类型、海流和水深; 与污染源距离、与航道距离、离岸距离的总要性水平和重要百分比均大

于6.50和24.01(图5), 因此以上11个次级准则最终被确定为选址的有效次级准则。根据所有专家意见, 底质类型、海流和水深是最重要的3个准则。底质类型的重要性水平和重要百分比分别为8.13和30.12。海流和水深的重要性水平和重要百分比值相同, 分别为7.07和26.17。

2.2 权重赋值

保护型人工鱼礁选址的主要准则、次级准则及准则值的生物因素、物理因素和管理因素的权重分别为0.405、0.481和0.114(图6)。次级准则渔获量、资源密度、幼鱼量、幼鱼扩散、底部坡度、底质类型、海流和水深、与污染源距离、与航道距离、离岸距离的权重分别为0.095、0.184、0.048、0.079、0.101、0.186、0.097、0.098、0.068、0.030、0.016。

2.3 适宜性地图

基于11个次级准则的因素图层, 由加权线性组合(式7)计算研究区域的适宜性值:

$$FM = 0.095A + 0.184AD + 0.048LF + 0.079LD + 0.101BS + 0.186BT + 0.097MC + 0.098D + 0.068DP + 0.030DV + 0.016DC \quad (7)$$

式中, A为渔获量、AD为资源密度、LF为幼鱼量、LD为幼鱼扩散、BS为底部坡度、BT为底质

表2 准则标准化类型

Tab. 2 Criteria standardization type

主要准则 main criteria	权重 weight	次级准则 sub-criteria	权重 weight	控制点 control points				隶属度函数类型 membership function
				a	b	c	d	
物理因素 physical	0.481	底部坡度/(°) bottom slope	0.101	0	5	5	90	Z型隶属度函数 Z membership function
		底质类型 substrate	0.186	沙 sand	沙/石 sand/rock	沙/石 sand/rock	石 rock	S型隶属度函数 S membership function
	海流/(m/s) current	0.097		0	0.1	0.63	0.8	通用隶属度函数 general membership function
	水深/m depth	0.098		0	10	20	60	高斯隶属度函数 Gauss membership function
生物因素 biological	0.405	渔获量/kg catch	0.095	0	1.314	11.371	11.371	S型隶属度函数 S membership function
		资源密度/(kg/m ²) density	0.184	0	1.314	11.371	11.371	S型隶属度函数 S membership function
	幼鱼扩散/km larval dispersal	0.048	0	1	1	1	S型隶属度函数 S membership function	
	存在自然幼鱼/kg existing larvae	0.079	0	0.43	5.91	5.91	S型隶属度函数 S membership function	
管理因素 management	0.114	与污染源距离/km distance to pollution source	0.068	0	1	1	1	S型隶属度函数 S membership function
		与航道距离/km distance to channel	0.030	0	1	1	1	S型隶属度函数 S membership function
		离岸距离/km distance to coastline	0.016	0	1	1	1	S型隶属度函数 S membership function

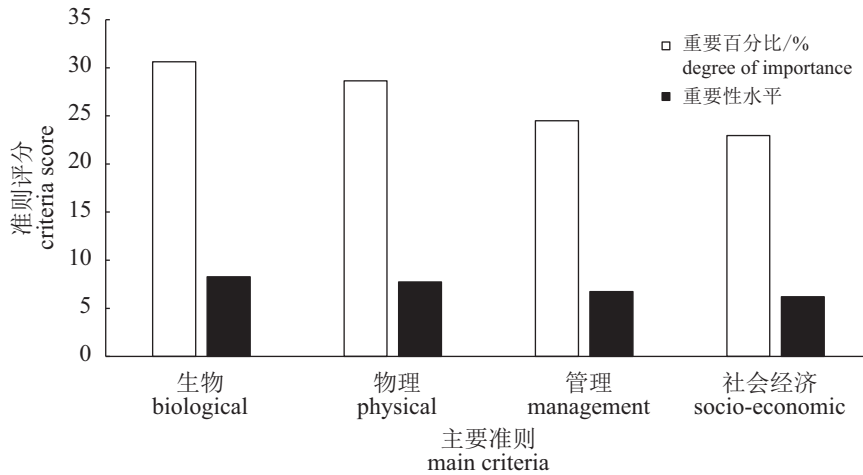


图 4 主要准则专家评分结果(重要百分比、重要性水平)

Fig. 4 The criteria score of main criteria (importance of criteria in percent, degree of importance of the criteria)

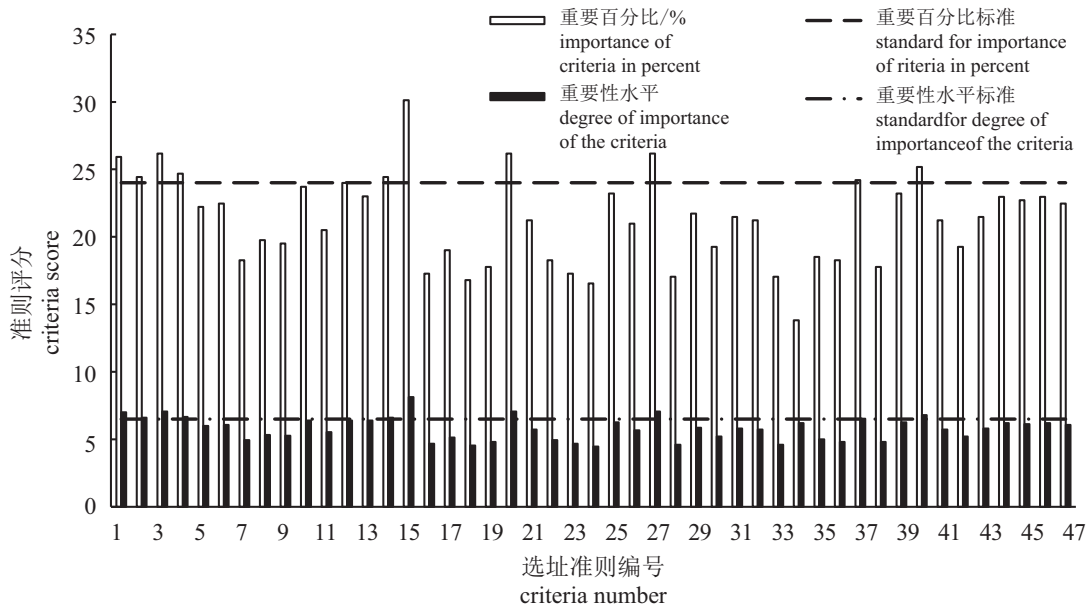


图 5 次级准则专家评分结果(重要百分比、重要性水平)

1.现存的海底群落;2.幼鱼扩散;3.存在自然幼鱼;4.便于管理;5.利益相关者容易接近;6.对当地经济的利益;7.文化价值;8.经济优势;9.教育价值;10.旅游价值;11.居民的支持水平;12.休闲娱乐价值;13.建造、投放以及维护费用;14.底部坡度;15.底质类型;16.叶绿素a; 17.光;18.溶解无机物;19.溶解有机物;20.海流;21.溶解氧;22.生化需氧量;23.酸碱度;24.盐度;25.潮流;26.浊度;27.水深;28.水温;29.波浪;30.风;31.风暴潮;32.底质粒径;33.目标种与竞争物种间的距离;34.与海水淡化装置的距离;35.与自然礁的距离;36.与石油和天然气平台的距离;37.与污染源的 距离;38.与发电设备的距离;39.与敏感生态系统的距离;40.与航道的距离;41.与退化区域距离;42.与捕食物种的距离;43.与海岸线距离;44.与拖网路线距离;45.与海藻场距离;46.与鱼类定居点距离;47.与渔场距离

Fig. 5 The criteria score of sub-criteria (importance of criteria in percent, degree of importance of the criteria)

1. existing community; 2. larval dispersal; 3. existing larvae; 4. benefit for managing; 5. easy for manager to access; 6. benefit for local economic; 7. cultural benefit; 8. economic value; 9. education value; 10. tourism value; 11. residents supportive level; 12. entertainment value; 13. cost for constructing and maintaining; 14. bottom slope; 15. substrate; 16. *Chl.a*; 17. light; 18 dissolved inorganic; 19. dissolved organic; 20. current; 21. dissolved oxygen; 22. biochemical oxygen demand; 23. pH; 24. salinity; 25. tide; 26. turbidity; 27. depth; 28. temperature; 29. wave; 30. wind; 31. storm tide; 32. sedimentary particle size; 33. distance to competitor; 34. distance to desalination facility; 35. distance to natural reef; 36. distance to oil and gas platform; 37. distance to pollution source; 38. distance to power equipment; 39. distance to sensitive ecosystems; 40. distance to channel; 41. distance to degraded region; 42. distance to the predator; 43. distance to coastline; 44. distance to trawl line; 45. distance to kelp forest; 46. distance to fish settlement; 47. distance to fishing ground

类型、 MC 为海流、 D 为水深、 DP 为与污染源距离、 DV 为与航道距离、 DC 为离岸距离。

由于该区域并未对幼鱼扩散进行调查, 因此本实验未将其纳入加权线性组合计算中。经过对因素图层和排除图层的叠加分析(式5~7), 得到马鞍列岛岛礁海域保护型人工鱼礁投放的适宜性(图7)。

3 讨论

3.1 选址准则

人工鱼礁的选址受鱼礁用途、海洋生物、水质、底质、气象水文等诸多因素的影响^[21]。结合文献资料和专家经验的研究结果显示对岛礁海域保护型人工鱼礁而言, 物理因素、生物因

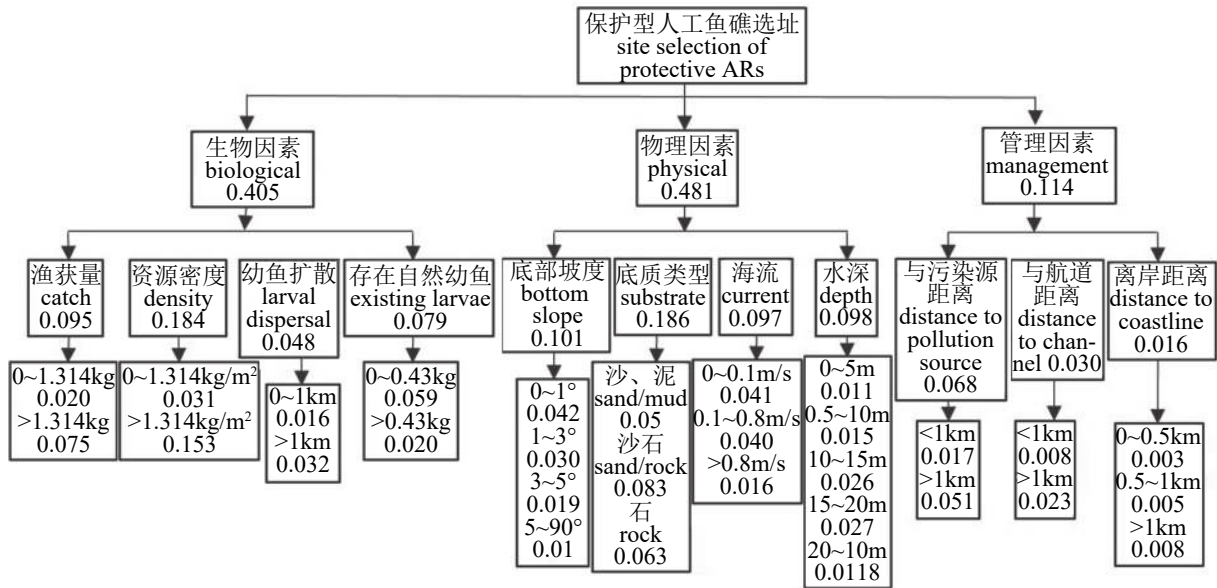


图6 保护型人工鱼礁主要准则、次级准则及准则值的权重

Fig. 6 Weight of protective artificial reefs (ARs) main criteria and sub-criteria

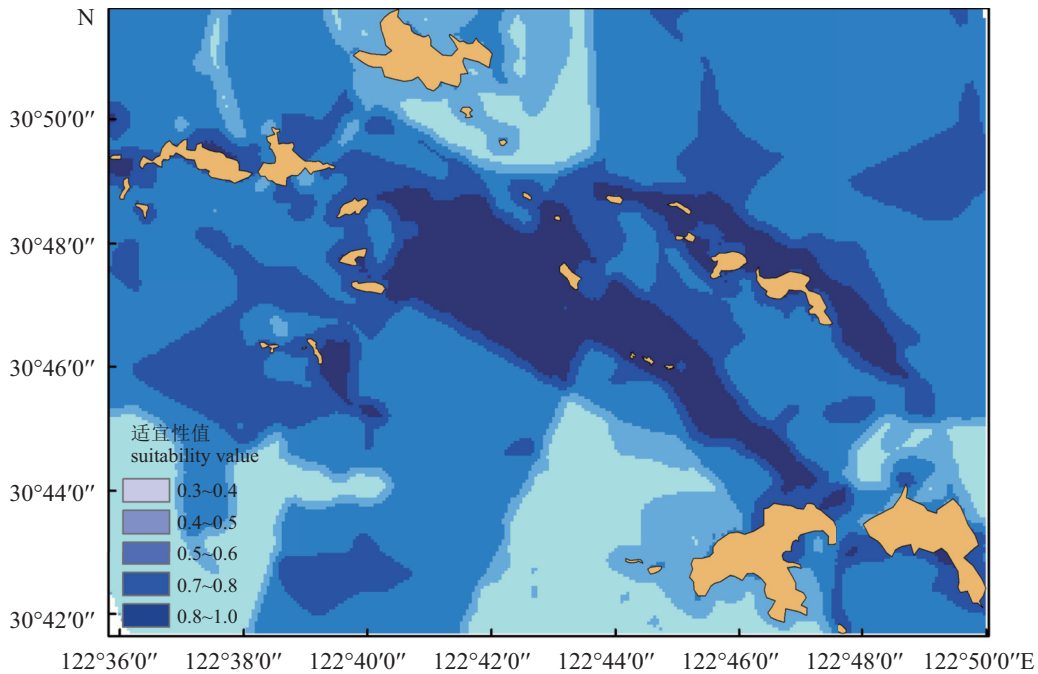


图7 马鞍列岛保护型人工鱼礁选址适宜性分布示意图

Fig. 7 Suitability map of protective artificial reefs in the Ma'an Archipelago

素和管理因素是影响其选址的主要因素，对应的次级准则为底部坡度、底质类型、海流、水深；渔获量、资源密度、幼鱼量、幼鱼扩散；与污染源距离、与航道距离、离岸距离(图8)。王飞等^[23]等和许妍等^[24]在舟山和天津近海海域人工鱼礁选址研究中将水深、底质类型、地形坡度、生物密度、平均流速、离岸距离、重要渔业水域作为选址指标，但并未考虑目标种幼鱼的生物量和扩散、与航道距离、与污染源距离。投礁区域有无目标种存在将对礁体的增殖效果产生影响，趋礁性鱼类移动距离较短，因此应考虑在其存在的区域投放保护型人工鱼礁。而考虑与航道的距离可以避免人工鱼礁受到航运的影响。另一方面，岛礁海域人类活动频繁，海岛开发、工业生产和水产养殖污水将对海区造成污染，靠近污染源的区域不适宜渔业资源的修复，因此在该区域进行人工鱼礁选址时有必要考虑与污染源的距離。

3.2 准则权重

选址准则权重的确定是选址模型中最为关键的一步。由两两比较法计算出的主要准则，物

理因素、生物因素和管理因素的权重为0.481、0.405、0.114。该权重排序与Mousavi等^[21]对修复珊瑚礁的人工鱼礁选址结果一致，但本实验中生物因素的权重较高。这是由鱼礁的投放目标不同造成的，本实验中的保护型人工鱼礁用于修复趋礁性鱼类栖息地，保护其不受破坏性底拖网的伤害，投放区域是否存在目标生物，资源的密度等生物因素将对礁体的养护效果起到重要影响。本实验的结果显示底质类型(0.186)是对岛礁海域保护型人工鱼礁影响最大的次级准则。这与Chang等^[4]在关于台湾的海湾增殖型人工鱼礁选址实验中认为的水深是最重要的次级准则有所不同。首先，保护型人工鱼礁针对趋礁性鱼类，目标种的有无关系到礁体效能的发挥，而影响趋礁性鱼类分布最重要的因子是底质类型^[11]。

3.3 适宜性分布

马鞍列岛岛礁海域的物理环境和生物因素具有很强的空间异质性^[10]，该区域的底质类型、水深和资源密度的分布状况。将本研究输出的适宜性分布图与底质类型、水深和资源密度分布图对应分析可以发现，马鞍列岛保护型人工

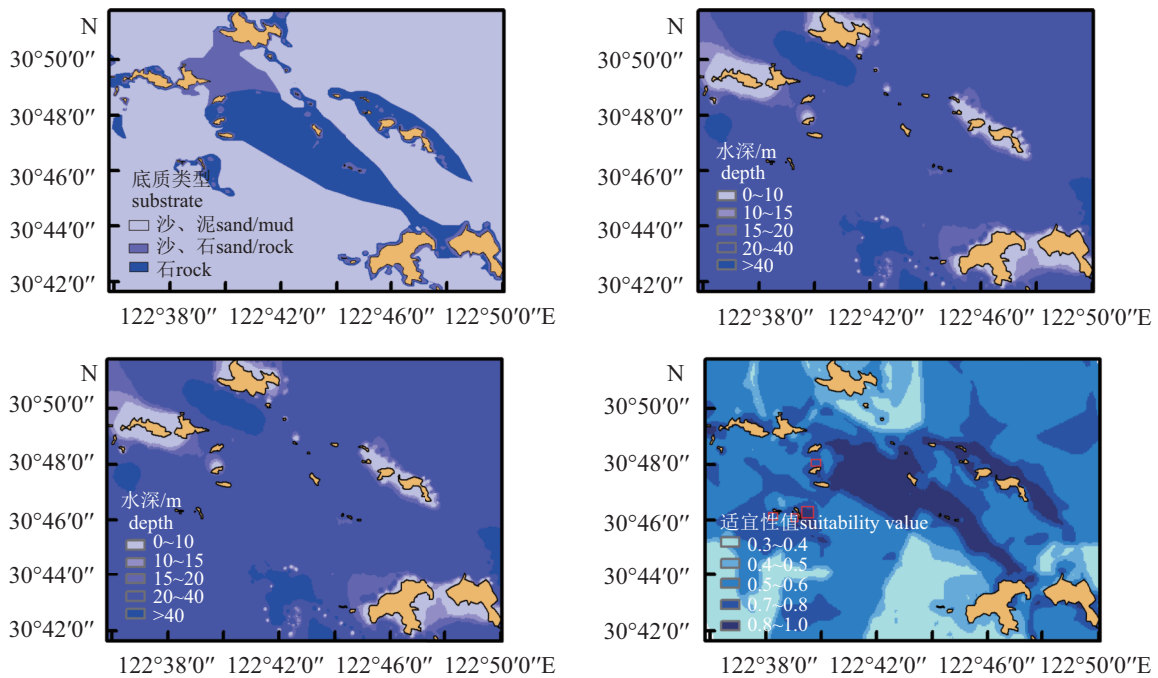


图 8 马鞍列岛底质类型、水深、资源密度、选址适宜性分布图

适宜性分布图中红色框选区域为已投放人工区域

Fig. 8 Substrate type, depth, resources density and site selection suitability distribution in the Ma'an Archipelago

The red rectangle area have been placed artificial reefs

鱼礁选址适宜性高的区域具有如下特点:底质类型为沙、石和石;水深主要为20~40 m;资源密度大于1.314 kg/m²(2009年渔业资源调查密度平均值),与本实验设置的选址准则适宜性基本一致,其中适宜性分布图中的红色框选区域早在2004年进行了人工鱼礁投放,根据投放后的建设效应评价^[25-26],该区域投放人工鱼礁后,与未投放人工鱼礁的对照区相比,生产力得到了提高,群落结构得以明显改善,且发挥了积极的鱼类和大型无脊椎动物的诱集效果和资源增殖作用。由此说明,本实验选址方法可以对岛礁海域保护型人工鱼礁选址进行有效评价。

本研究尝试结合文献资料和专家问卷的方式选取有效准则和赋予准则权重,该方法不仅能将前人的研究进行归纳总结,还能因地制宜地加入对研究区域具有丰富经验的专家知识,避免了选址的主观性。但专家系统的建立和问卷调查的轮次还需完善,以更加全面和精确地获取对选址有效的准则和权重。另一方面,适宜性地图的输出对准则数据的输入有很强的依赖性^[16],数据应来自最新调查、且具有相同的空间分辨率,这需要在今后的人工鱼礁选址中加以研究。

感谢在本研究中参与问卷调查的各位专家的积极配合,感谢汪振华、王凯、赵静老师提供的建议。

参考文献:

- [1] 李文涛,张秀梅.关于人工鱼礁礁址选择的探讨[J].现代渔业信息,2003,18(5):3-6.
Li W T, Zhang X M. A study on site selection of artificial reef[J]. Modern Fisheries Information, 2003, 18(5): 3-6(in Chinese).
- [2] Vijayakumaran K. Book Review: Artificial reef evaluation with application to Natural Marine Habitats[J]. Marine Fisheries Information Service Technical and Extension Series, 2006(189): 27-28.
- [3] Baine M. Artificial reefs: A review of their design, application, management and performance[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2001, 44(3-4): 241-259.
- [4] Chang K H. Review of Artificial Reefs in Taiwan: Emphasizing site selection and effectiveness[J]. *Bulletin of Marine Science*, 1985, 37(1): 143-150.
- [5] 赵静,章守宇,沈天跃,沈蔚.人工鱼礁投放误差分布研究[J].水产学报,2016,40(11):1790-1799.
Zhao J, Zhang S Y, Shen T Y, *et al.* Distribution model of deviation in artificial reef installation[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(11): 1790-1799(in Chinese).
- [6] Barber J S, Whitmore K A, Rousseau M, *et al.* Boston harbor artificial reef site selection & monitoring program[R]. Massachusetts Division of Marine Fisheries, Technical Report TR-35, 2009.
- [7] 孙利元.山东省人工鱼礁建设效果评价[D].青岛:中国海洋大学,2010.
Sun L Y, Evaluation of artificial reef construction in Shandong Province[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010 (in Chinese).
- [8] 唐衍力,于晴.基于熵权模糊物元法的人工鱼礁生态效果综合评价[J].中国海洋大学学报,2016,46(1):18-26.
Tang Y L, Yu Q. An integrative evaluation of ecological effect of artificial reefs with entropy-weighted fuzzy matter-element method[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(1): 18-26(in Chinese).
- [9] 全国水产标准化技术委员会渔业资源分技术委员会. SC/T 9416-2014人工鱼礁建设技术规范[S].北京:中国农业出版社,2014.
Subcommittee 10 on Fisheries Resource of National Technical Committee 156 on Aquaculture of Standardization Administration of China. SC/T 9416-2014 Technical specifications for artificial reef construction[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2014 (in Chinese).
- [10] 章守宇,汪振华,林军,等.枸杞岛海藻场夏、秋季的渔业资源变化[J].海洋水产研究,2007,28(1):45-52.
Zhang S Y, Wang Z H, Lin J, *et al.* Variation of fisheries resources in summer and autumn in seaweed beds of Gouqi Island[J]. *Marine Fisheries Research*, 2007, 28(1): 45-52(in Chinese).
- [11] 汪振华,赵静,王凯,等.马鞍列岛岩礁生境鱼类群落结构时空格局[J].生态学报,2013,33(19):6218-6226.
Wang Z H, Zhao J, Wang K, *et al.* Fish community ecology in rocky reef habitat of Ma'an Archipelago II. Spatiotemporal patterns of community structure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6218-6226(in Chinese).
- [12] Green D R, Ray S T. Using GIS for siting artificial reefs—data issues, problems and solutions: ‘Real World’ to ‘Real World’[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2002, 8(1): 7-16.
- [13] Green D R, King S D. Coastal and Marine Geo-Informa-

- tion Systems: Applying the Technology to the Environment[M]. Dordrecht, The Netherlands, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [14] Kennish R, Wilson K D P, Lo J, *et al.* Selecting sites for large-scale deployment of artificial reefs in Hong Kong: Constraint mapping and prioritization techniques[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2002, 59(S1): S164-S170.
- [15] Wright R, Ray S, Green D R, *et al.* Development of a GIS of the Moray Firth (Scotland, UK) and its application in environmental management (site selection for an ‘artificial reef’)[J]. *Science of the Total Environment*, 1998, 223(1): 65-76.
- [16] Ramanathan R. A note on the use of the analytic hierarchy process for environmental impact assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2001, 63(1): 27-35.
- [17] Buitrago J, Rada M, Hernández H, *et al.* A single-use site selection technique, using GIS, for aquaculture planning: Choosing locations for mangrove oyster raft culture in Margarita Island, Venezuela[J]. *Environmental Management*, 2005, 35(5): 544-556.
- [18] Silva C, Ferreira J G, Bricker S B, *et al.* Site selection for shellfish aquaculture by means of GIS and farm-scale models, with an emphasis on data-poor environments[J]. *Aquaculture*, 2011, 318(3-4): 444-457.
- [19] Radiarta I N, Saitoh S I, Yasui H. Aquaculture site selection for Japanese kelp (*Laminaria japonica*) in southern Hokkaido, Japan, using satellite remote sensing and GIS-based models[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2011, 68(4): 773-780.
- [20] Mousavi S H, Danehkar A, Shokri M R, *et al.* 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*, 2015, 111: 92-102.
- [21] Saaty T L. How to Make a Decision: The analytic hierarchy process[J]. *European Journal of Operational Research*, 1990, 48(1): 9-26.
- [22] 赵海涛, 张亦飞, 郝春玲, 等. 人工鱼礁的投放区选址和礁体设计[J]. *海洋学研究*, 2006, 24(4): 69-76.
Zhao H T, Zhang Y F, Hao C L, *et al.* Siting and designing of artificial reefs[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2006, 24(4): 69-76(in Chinese).
- [23] 王飞, 张硕, 丁天明. 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*, 2008, 26(1): 65-71.
Wang F, Zhang S, Ding T M. Evaluation on weight factors affecting artificial reefs site selection in Zhoushan area based on AHP[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2008, 26(1): 65-71(in Chinese).
- [24] 许妍, 鲍晨光, 梁斌, 等. 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*, 2016, 35(6): 846-852, 867.
Xu Y, Bao C G, Liang B, *et al.* Suitability evaluation of artificial reefs site selection in Tianjin offshore waters area[J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(6): 846-852, 867(in Chinese).
- [25] 刘舜斌, 汪振华, 林良伟, 等. 嵊泗人工鱼礁建设初期效果评价[J]. *上海水产大学学报*, 2007, 16(3): 297-302.
Liu S B, Wang Z H, Lin L W, *et al.* Preliminary evaluation on effects of artificial reef project in Shengsi[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2007, 16(3): 297-302(in Chinese).
- [26] 汪振华, 章守宇, 王凯, 等. 三横山人工鱼礁区鱼类和大型无脊椎动物诱集效果初探[J]. *水产学报*, 2010, 34(5): 751-759.
Wang Z H, Zhang S Y, Wang K, *et al.* A preliminary study on fish and macroinvertebrate enhancement in artificial reef area around Sanheng Isle, Shengsi, China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(5): 751-759(in Chinese).

Site selection suitability assessment for protective artificial reefs in island area

ZENG Xu, ZHANG Shouyu*, LIN Jun*, ZHONG Jiaming

(College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: There were more than thirty countries and regions which placed artificial reefs in coastal areas. However, more than fifty percent of these Artificial Reefs failed due to improper site selection, lack of supervision and planning. Placing the Artificial Reefs consumes large amount of time and finances which means that it's impossible to change Artificial Reefs location. Therefore, the success of Artificial Reefs depends on the site selection. Most studies of Artificial Reefs focused on their ecological effects, and these results could be used for evaluating the effectiveness, but they did not provide necessary references for Artificial Reefs site selection. For assessing the site selection suitability of Artificial Reefs, our study took island area protective Artificial Reefs site selection as the theme and the Multi-Criteria Decision Method was used in this study. Expert system, Analytic Hierarchy Process (AHP), GIS spatial analysis and raster calculation were also combined. The effective main criteria (physical, biological and management) and sub-criteria (bottom slope, substrate, current, depth, catch, density, larval dispersal, existing larvae, distance to pollution source, distance to channel, distance to coastline) for protective Artificial Reefs were identified by paper reviewing and expert knowledge. Using the pair-wise comparison and AHP, the weight of main criteria and sub-criteria were ranked, and the results showed the weight of physical, biological and management were 0.481, 0.405, 0.114 respectively. The weight of sub-criteria were corresponding 0.101, 0.186, 0.097, 0.098, 0.095, 0.184, 0.048, 0.079, 0.068, 0.030, 0.016. The site selection suitability in Ma'an Archipelago showed spatial heterogeneity after calculating overlapped criteria map. The corresponding analysis of depth, substrate type, resource density distribution and suitability distribution showed that the model results were consistent with the suitability criteria. And the high suitability areas where Artificial Reefs have been placed also showed effectiveness. Therefore, the assessment model of this study could be used for assessing the site selection suitability of protective artificial reefs in similar island areas.

Key words: protective artificial reefs; site selection suitability; multi-criteria decision; analytic hierarchy process(AHP); geographic information system(GIS); Ma'an Archipelago

Corresponding author: ZHANG Shouyu. E-mail: syzhang@shou.edu.cn; LIN Jun. E-mail: jlin@shou.edu.cn

Funding projects: Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201303047)