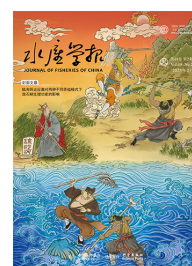


DOI: 10.11964/jfc.20220813628

基于物种分布模型的车由岛人工鱼礁区底层游泳生物的空间分布



葛畅¹, 于浩林², 刘淑德³, 唐衍力^{1*}, 于梦杰¹, 韦雯钰¹, 盛化香¹

1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003; 2. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266003; 3. 山东省渔业发展与资源养护总站, 山东 烟台 264003

摘要:

【目的】探究人工鱼礁投放对底层游泳生物分布的影响。

【方法】于2019—2021年共进行11个航次的调查。利用物种分布模型(SDMs)研究常见底层游泳生物的出现概率、丰度、体长、体重、群落丰富度等指标与离礁距离的响应关系, 归纳车由岛人工鱼礁区对底层生物的影响范围, 并拟合各物种出现概率的空间分布加以验证。

【结果】SDM模型显示, 根据物种出现概率对离礁距离变量的响应曲线可以将物种划分为恋礁型、中间型和离礁型, 恋礁型偏好分布于距离礁体0~375 m处, 中间型为50~375 m, 离礁型为225~879 m。恋礁型和中间型的物种丰度在离礁0~225 m处较大, 离礁型为325~879 m。恋礁型和离礁型物种的体长和体重在离礁0~225 m处均较大, 中间型物种为0~525 m。群落丰富度在0~225 m处较高。

【结论】各物种拟合的空间分布结果与各指标对离礁距离响应关系基本一致。本研究揭示了不同底层游泳生物对离礁距离的响应特征变化, 探究了不同指标下人工鱼礁的影响范围, 为海洋牧场人工鱼礁的建设规划与管理提供参考依据。

关键词:人工鱼礁; 底层游泳生物; 生物影响范围; 离礁距离; 物种分布模型; 车由岛

人工鱼礁作为防止栖息地退化、提高海域初级生产力、修复和增殖渔业资源的重要措施, 是我国海洋牧场建设的主要内容。人工鱼礁的投放会改变其周围流场分布, 形成的上升流将底层营养盐带至水体上层, 有利于浮游植物和藻类等基础饵料生物的生长和繁殖, 并为其他消费者提供食物来源^[1]。研究表明, 人工鱼礁区的物种多样性^[2]、渔业资源量和初级生产力水平相比对照区显著增加^[3-5]。

物种分布模型(species distribution models, SDMs)是基于研究区域的物种分布信息和环境数据, 拟合得出物种分布与环境因子之间的关系, 并以概率的形式反映物种对栖息地的偏好程度的一类模型^[6-8]。目前SDM被广泛应用于海洋渔业中, 以预测物种分布^[9]、海域偷捕风险^[10]、

第一作者: 葛畅, 从事海洋牧场研究, E-mail: 1427340070@qq.com



通信作者: 唐衍力, 从事选择性渔具、人工鱼礁与海洋牧场等研究, E-mail: tangyanli@ouc.edu.cn



资助项目: 山东近海渔业资源调查与监测(37000022P11000111802T)

收稿日期: 2022-08-02

修回日期: 2022-09-20

文章编号:

1000-0615(2025)02-029309-15

中图分类号: S 932.2

文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)



鱼类丰度和多样性^[11]等。其中, 增强回归树(Boosted Regression Trees, BRT)算法在简单线性模型的基础上加入增强与投票机制进行优化, 具有较好的模型精度^[12]。近年来, BRT 逐渐用于海洋沿岸或湖泊等较小尺度水域物种分布的研究, Froeschke 等^[13]使用 BRT 和人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)算法预测沿岸海湾漠斑牙鲆(*Paralichthys lethostigma*)幼鱼丰度以保护渔业资源; Lewin 等^[14]基于 BRT 算法比较了显著影响湖泊鱼类分布的环境因素之间的相对重要性。人工鱼礁投放后会诱集周围海域的海洋生物并起到一定的增殖效果, 改变原来海域物种的空间分布格局, 但人工鱼礁对不同物种分布的影响范围鲜有报道, 这对礁区生物群落管理和人工栖息地规划建设带来了挑战。使用 BRT 模型可以对人工鱼礁区生物影响范围及物种分布进行较为精确的分析。

本实验以车由岛人工鱼礁区为研究区域, 结合水下摄像与地笼调查方法, 使用 BRT 拟合常见底层游泳生物的出现概率、丰度、体长、体重、群落丰富度等指标与离礁距离的响应关系, 探究车由岛海域人工鱼礁对底层游泳生物分布的影响范围, 为海洋牧场人工鱼礁的建设规划与资源养护管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 调查时间与站位

研究区域位于山东长岛的车由岛东北部海域, 面积约 189.1 hm², 泥沙底, 2019 年初在该海域以 200 m 为半径的范围内投放混凝土构件礁体, 鱼礁单体规格为 7.1 m×7.1 m×3.4 m(图 1)。

本研究以车由岛人工鱼礁区为中心, 分别以 200、600 和 1 000 m 为半径将海域划分为 3 个样带, 按照分层随机取样法, 在每个样带中地笼与摄像各设置 3 个站位。调查时间为 2019 年 5 月、7 月、10 月, 2020 年 1 月、5 月、8 月、11 月和 2021 年 1 月、5 月、8 月、10 月, 共进行 11 个航次的调查, 地笼站位共 80 个、水下摄像站位共 47 个(图 1)。实验过程中操作人员严格遵守实验动物管理和使用伦理规范。

1.2 调查内容与方法

调查内容包括渔业资源调查与水文调查两部分。样品采集与分析分别按照国家标准^[15-16]进行。

地笼网网目尺寸为 2 cm, 矩形尺寸为 37 cm×22 cm, 每只地笼网包含 25 节, 1 组由 5 只串联构成, 每个站点放置 3 组。地笼网放置时间为 48 h, 无饵料, 渔获物上岸后带回实验室进行物种鉴定及生物学测量。水下摄像采用样带法^[17]由潜水员手持 GoPro Hero 4 水下运动摄像机对该站位海域底层游泳生物进行单方向样带区间游动拍摄, 在实验室中对视频中所有物种进行识别与计数。

海域温度、溶解氧及盐度由多参数水质仪(YSI Proplus)测得。水深由手持式水深仪(DMT-20)测得。透明度由塞氏盘法测得。离礁距离通过 R 语言(4.1.0 版本) dismo 软件包计算每个站位与投礁位置的距离。底质类型为泥底和人工鱼礁。采样方法为地笼和水下摄像。

1.3 物种筛选与拟合指标

为减少罕见种对分析的干扰, 将物种出现站位占总站位数 10% 以下的物种剔除^[11], 筛选

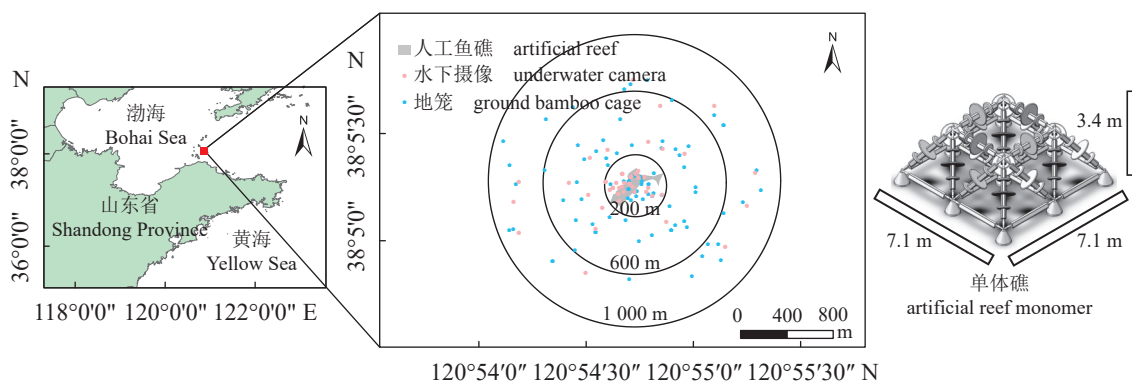


图 1 调查站位分布 (a) 及人工鱼礁单体结构示意图 (b)

Fig. 1 Distribution of the sampling sites (a) and the structure diagram of the artificial reef monomer (b)

后对物种与环境因子进行方差膨胀系数 (variance inflation factor, VIF) 和蒙特卡罗置换检验分析, 筛选 VIF<10 的环境变量^[18]。

1.4 模型拟合与预测

研究采用 BRT 算法, 以不同环境因子和采样方法为解释变量, 分别以海区物种出现或不出现、丰度、丰富度、体长和体重为响应变量对训练数据集进行建模。模拟过程中, 通过使用交叉验证优化迭代次数, 确定树的复杂程度、学习率等参数^[19]。使用 AUC (ROC 曲线下的面积) 和 cv correlation 的值来评估模型的准确性。AUC 值为 0~1, cv correlation 值为 0~1。本研究选取 AUC>0.7、cv correlation>0.4 为模型选择标准^[11]。此部分使用 R 语言 gbm 软件包完成。

拟合物种与解释变量的响应关系图, 除离

礁距离外, 固定每个解释变量第 1 次拟合值为 0 时所对应的值, 拟合常见种在人工鱼礁 0~879 m 范围内出现、丰度、体长、体重情况, 绘制人工鱼礁周围物种出现概率的插值图, 此部分使用 Golden Software Surfer 14.0 软件完成。整合各指标下物种与离礁距离的关系, 绘制物种出现概率预测值与离礁距离响应的堆积面积图, 此部分使用 Origin 9.1 软件完成。

2 结果

2.1 渔获物种类组成

2019—2021 年车由岛人工鱼礁区调查共发现 94 个物种, 其中, 鱼类 42 种、甲壳类 23 种、头足类 5 种、腹足类 10 种、棘皮类 10 种。本研究共筛选出 21 种常见种进行分析 (表 1), 包

表 1 常见种丰度、出现站位百分比及各指标拟合情况

Tab. 1 Abundance, percentage of occurrence stations, and fitted indexes of common species

| 种 species | 丰度/只 abundance | 站位出现百分比/% percentage of occurrence stations | 参与SDM模型拟合指数 fitting index | | | |
|---|-------------------|---|----------------------------|-----------------|--------------|--------------|
| | | | 出现/不出现 presence/absence | 丰度 abundance | 体长 length | 体重 weight |
| 大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i> | 809 | 85.83 | — | √ | √ | √ |
| 日本蟳 <i>Charybdis japonica</i> | 408 | 62.99 | √ | √ | √ | √ |
| 矛尾虾虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i> | 221 | 40.94 | √ | √ | √ | √ |
| 许氏平鲷 <i>Sebastes schlegelii</i> | 131 | 38.58 | √ | — | — | — |
| 多棘海盘车 <i>Asterias amurensis</i> | 92 | 33.07 | — | — | — | — |
| 口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i> | 92 | 32.28 | √ | √ | — | — |
| 长蛸 <i>Octopus variabilis</i> | 114 | 26.77 | — | — | — | — |
| 脉红螺 <i>Rapana venosa</i> | 55 | 25.98 | √ | √ | — | — |
| 海燕 <i>Asterina pectinifera</i> | 94 | 25.20 | — | — | — | — |
| 蓝无壳侧鳃 <i>Pleurbranchaea maculata</i> | 123 | 25.20 | — | — | — | — |
| 纹缟虾虎鱼 <i>Tridentiger trionocephalus</i> | 98 | 25.20 | √ | — | — | — |
| 栉江珧 <i>Atrina pectinata</i> | 120 | 21.26 | — | — | — | — |
| 马粪海胆 <i>Hemicentrotus pulcherrimus</i> | 63 | 20.47 | √ | — | — | — |
| 细条天竺鲷 <i>Jaydia lineata</i> | 640 | 19.69 | √ | — | √ | √ |
| 吉氏绵鳎 <i>Zoarces gillii</i> | 42 | 18.90 | √ | — | — | — |
| 寄居蟹科 <i>Paguridae</i> | 82 | 15.75 | — | — | — | — |
| 方氏云鳎 <i>Enedrias fangi</i> | 45 | 14.96 | √ | — | — | — |
| 绿鳍马面鲀 <i>Thamnaconus modestus</i> | 34 | 14.96 | √ | √ | — | — |
| 日本鼓虾 <i>Alpheus japonicus</i> | 67 | 14.17 | √ | √ | — | — |
| 黄鳍刺虾虎鱼 <i>Acanthogobius flavimanus</i> | 57 | 13.39 | — | — | — | — |
| 六丝钝尾虾虎鱼 <i>Amblychaeturichthys hexanema</i> | 39 | 10.24 | — | — | — | — |

注: “—”为拟合失败, “√”为拟合成功, 下同。

Notes: “—”. fitting failure; “√”. successful fitting, the same below.

括鱼类 10 种、甲壳类 4 种、棘皮类 3 种、腹足类 2 种、头足类 1 种、软体类 1 种。

2.2 环境因子筛选

环境变量筛选后, 底质、采样方法、溶解氧、离礁距离、水深、盐度、透明度、温度等 8 个变量 VIF 值均小于 5, 统计了环境变量变化范围 (表 2)。

2.3 SDM 结果

物种出现/不出现 由于大泷六线鱼出现站位百分比极高 (85.83%), BRT 算法无法将其与环境因子进行拟合, 剩余 20 种常见种中有 8 种拟合效果较差 ($AUC < 0.7$), 可信度较低, 其余 12 个物种获得了良好的拟合结果 ($AUC > 0.7$), 纹缟虾虎鱼的 $AUC > 0.9$, 拟合效果较好 (表 3)。

表 2 解释变量及变化范围

Tab. 2 The range of the explanatory variables

| 解释变量 explanatory variables | 范围 range |
|-------------------------------|-------------|
| 温度/°C temperature | 3.20~23.20 |
| 水深/m depth | 22.20~25.80 |
| 溶解氧/(mg/L) dissolved oxygen | 6.50~17.00 |
| 透明度/m transparency | 0.70~4.00 |
| 盐度 salinity | 30.95~33.00 |
| 离礁距离/m distance with reefs | 0~879.00 |
| 底质类型 substrate type | 泥底/人工鱼礁 |
| 采样方法 sampling method | 地笼/水下摄像 |

解释变量的贡献度分析显示, 影响物种出现/不出现的重要环境因素分别为温度、盐度和离礁距离 (表 4)。

表 3 生物影响范围与模型精度

Tab. 3 Biological influence scope and model accuracy

| 物种 species | 出现/不出现 presence/absence | | 丰度 abundance | | 体长 length | | 体重 weight | | 丰富度 richness | |
|-------------------------------------|------------------------------|-------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| | 影响范围/m influence scope | AUC | 影响范围/m influence scope | cv correlation | 影响范围/m influence scope | cv correlation | 影响范围/m influence scope | cv correlation | 影响范围/m influence scope | cv correlation |
| 大泷六线鱼 <i>H. otakii</i> | — | — | 0~225 | 0.698 | 0~175 | 0.524 | 0~190 | 0.515 | 0~225 | 0.489 |
| 许氏平鲉 <i>S. schlegelii</i> | 0~150 | 0.762 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 日本鲷 <i>C. japonica</i> | 0~200 | 0.812 | 0~250 | 0.432 | 50~175 | 0.656 | 0~575 | 0.691 | — | — |
| 绿鳍马面鲀 <i>T. modestus</i> | 0~125 | 0.898 | 0~210 | 0.455 | — | — | — | — | — | — |
| 脉红螺 <i>R. venosa</i> | 0~225 | 0.718 | 0~200 | 0.426 | — | — | — | — | — | — |
| 纹缟虾虎鱼 <i>T. trigronecephalus</i> | 0~190 | 0.916 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 马粪海胆 <i>H. pulcherrimus</i> | 0~375 | 0.703 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 口虾蛄 <i>O. oratoria</i> | 50~325 | 0.7 | 0~225 | 0.516 | — | — | — | — | — | — |
| 细条天竺鲷 <i>J. lineata</i> | 100~375 | 0.827 | — | — | 0~525 | 0.488 | 0~625 | 0.473 | — | — |
| 方氏云鲷 <i>E. fangi</i> | 225~879 | 0.708 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 吉氏绵鲷 <i>Z. gillii</i> | 225~325 | 0.755 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 矛尾虾虎鱼 <i>C. stigmatias</i> | 350~879 | 0.795 | 352~825 | 0.459 | 0~200 | 0.413 | 0~210 | 0.409 | — | — |
| 日本鼓虾 <i>A. japonicus</i> | 625~879 | 0.798 | 625~879 | 0.532 | — | — | — | — | — | — |

注: AUC和cv correlation值来评估模型的准确性。AUC>0.7、cv correlation>0.4 代表模型拟合精度高。

Notes: AUC and cv correlation values were used to evaluate the accuracy of the model. AUC>0.7, cv correlation>0.4 represent high fitting precision.

表 4 物种出现/不出现模型中预测因子贡献率

| 物种 species | 温度 temperature | 水深 depth | 溶解氧 dissolved oxygen | 透明度 transparency | 盐度 salinity | 离礁距离 distance with reefs | 底质类型 substrate type | 采样方法 sampling method | % |
|------------------------------------|-------------------|-------------|-------------------------|---------------------|----------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|---|
| 许氏平鲉 <i>S. schlegelii</i> | 19.8 | 2.1 | 11.3 | 10.7 | 13.9 | 33.1 | 5.6 | 3.5 | |
| 日本蟳 <i>C. japonica</i> | 17.3 | 7.9 | 17.5 | 11.5 | 10.5 | 33.3 | 0.8 | 1.2 | |
| 绿鳍马面鲀 <i>T. modestus</i> | 48.6 | 9.5 | 11.4 | 3.6 | 17.9 | 4.3 | 1.2 | 3.5 | |
| 脉红螺 <i>R. venosa</i> | 22.8 | 10.1 | 10.7 | 10.1 | 27.7 | 17.0 | 1.2 | 0.4 | |
| 纹缟虾虎鱼 <i>T. trigonocephalus</i> | 7.4 | 5.9 | 10.4 | 2.1 | 15.2 | 13.0 | 3.1 | 42.9 | |
| 马粪海胆 <i>H. pulcherrimus</i> | 7.6 | 16.0 | 14.7 | 8.8 | 31.2 | 18.7 | 1.3 | 1.7 | |
| 口虾蛄 <i>O. oratoria</i> | 26.4 | 8.4 | 9.8 | 3.2 | 14.4 | 19.4 | 2.2 | 16.2 | |
| 细条天竺鲷 <i>J. lineata</i> | 30.8 | 18.7 | 13.5 | 4.5 | 13.2 | 15.9 | 1.8 | 1.6 | |
| 方氏云鲷 <i>E. fangi</i> | 30.5 | 17.8 | 13.9 | 7.7 | 6.1 | 22.8 | 0.5 | 0.7 | |
| 吉氏绵鲷 <i>Z. gillii</i> | 8.1 | 35.9 | 6.3 | 4.4 | 19.4 | 22.9 | 1.7 | 1.3 | |
| 矛尾虾虎鱼 <i>C. stigmatias</i> | 16.7 | 17.8 | 8.1 | 15.0 | 20.4 | 18.8 | 1.4 | 1.8 | |
| 日本鼓虾 <i>A. japonicus</i> | 14.3 | 10.8 | 22.0 | 1.9 | 8.9 | 25.6 | 3.8 | 12.7 | |

注: 加粗值为前3个预测变量。

Notes: The top three predictor variables were shown in bold.

许氏平鲉、纹缟虾虎鱼、马粪海胆、吉氏绵鲷、矛尾虾虎鱼在 0~9 °C 出现概率与温度呈负相关, 出现概率随温度的降低而升高。绿鳍马面鲀对温度响应呈钟形曲线, 0~15 °C 时出现概率随温度的增加呈上升趋势, 高于 15 °C 出现概率逐渐下降。日本蟳、脉红螺、口虾蛄、细条天竺鲷、方氏云鲷、日本鼓虾出现概率与温度呈正相关, 当温度大于 8 °C 时出现概率随温度增加而增大 (图 2)。

纹缟虾虎鱼、口虾蛄、方氏云鲷、日本鼓虾在盐度为 31.0~31.7 时的出现概率与盐度呈负相关, 出现概率随盐度降低而升高。许氏平鲉和马粪海胆对盐度的响应呈钟形曲线, 盐度小于 32.3 时, 出现概率随盐度的增加呈上升趋势, 32.3 之后又逐渐下降。日本蟳、绿鳍马面鲀、脉红螺、细条天竺鲷、吉氏绵鲷、矛尾虾虎鱼在盐度大于 32.1 时的出现概率与盐度呈正相关, 出现概率随盐度增加而增大 (图 3)。

许氏平鲉、日本蟳、绿鳍马面鲀、脉红螺、纹缟虾虎鱼、马粪海胆的出现概率与离礁距离呈负相关 (图 4), 离礁越近物种出现概率越大。口虾蛄和细条天竺鲷对人工鱼礁的响应呈钟形曲线, 在距离人工鱼礁 50 m 范围内拟合值为负值, 随距离的增加呈现上升趋势, 到达峰值后逐渐下降为负值。方氏云鲷、吉氏绵鲷、矛尾虾虎鱼、日本鼓虾与离礁距离呈正相关, 离礁越远物种拟合值越大。

丰度 将各站位各物种丰度除以放网天数进行标准化并对数转换 $\ln(x+1)^{[20]}$, 与各环境因子进行 BRT 算法的模型拟合, 结果显示仅有 7 个物种丰度的拟合结果较好 (cv correlation>0.4, 表 3)。研究表明大泷六线鱼、口虾蛄、日本蟳、绿鳍马面鲀和脉红螺在距离人工鱼礁 0~225 m 范围内拟合值大于 0, 225~879 m 范围内拟合值小于 0; 矛尾虾虎鱼、日本鼓虾在 0~375 m 范围内拟合值小于 0, 375~879 m 范围内拟合值大于 0 (图 5)。

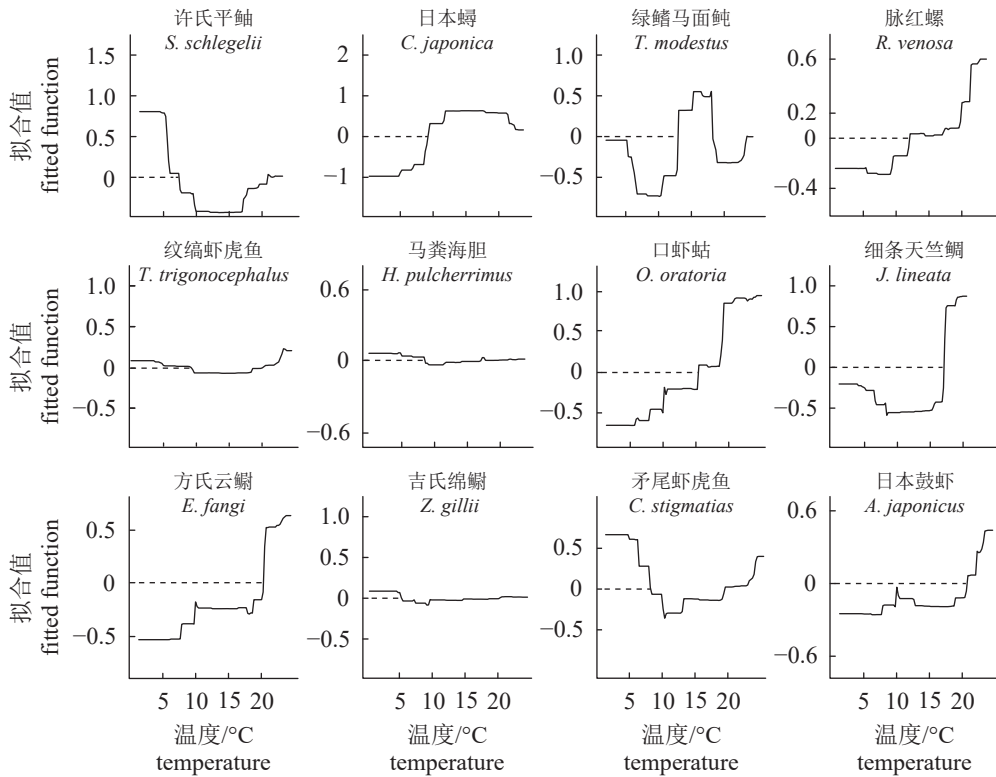


图 2 各物种出现/不出现与温度的响应关系

Fig. 2 Response relationships between species with presence/absence forms and temperature

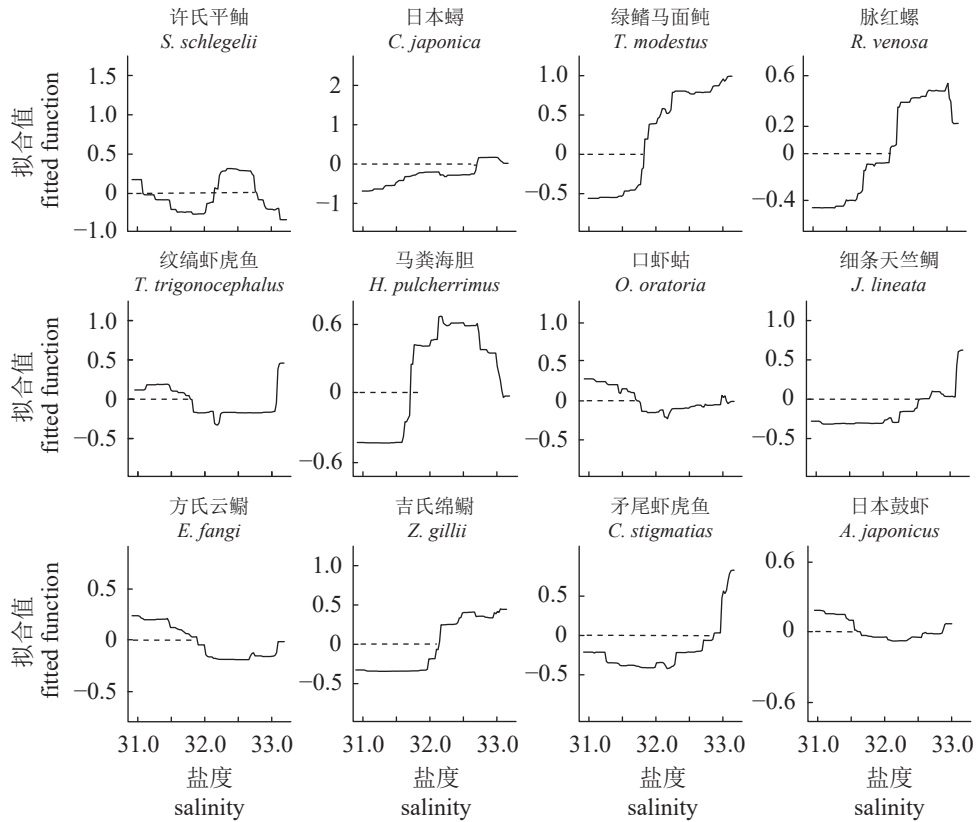


图 3 各物种出现/不出现与盐度的响应关系

Fig. 3 Response relationships between species with presence/absence forms and salinity

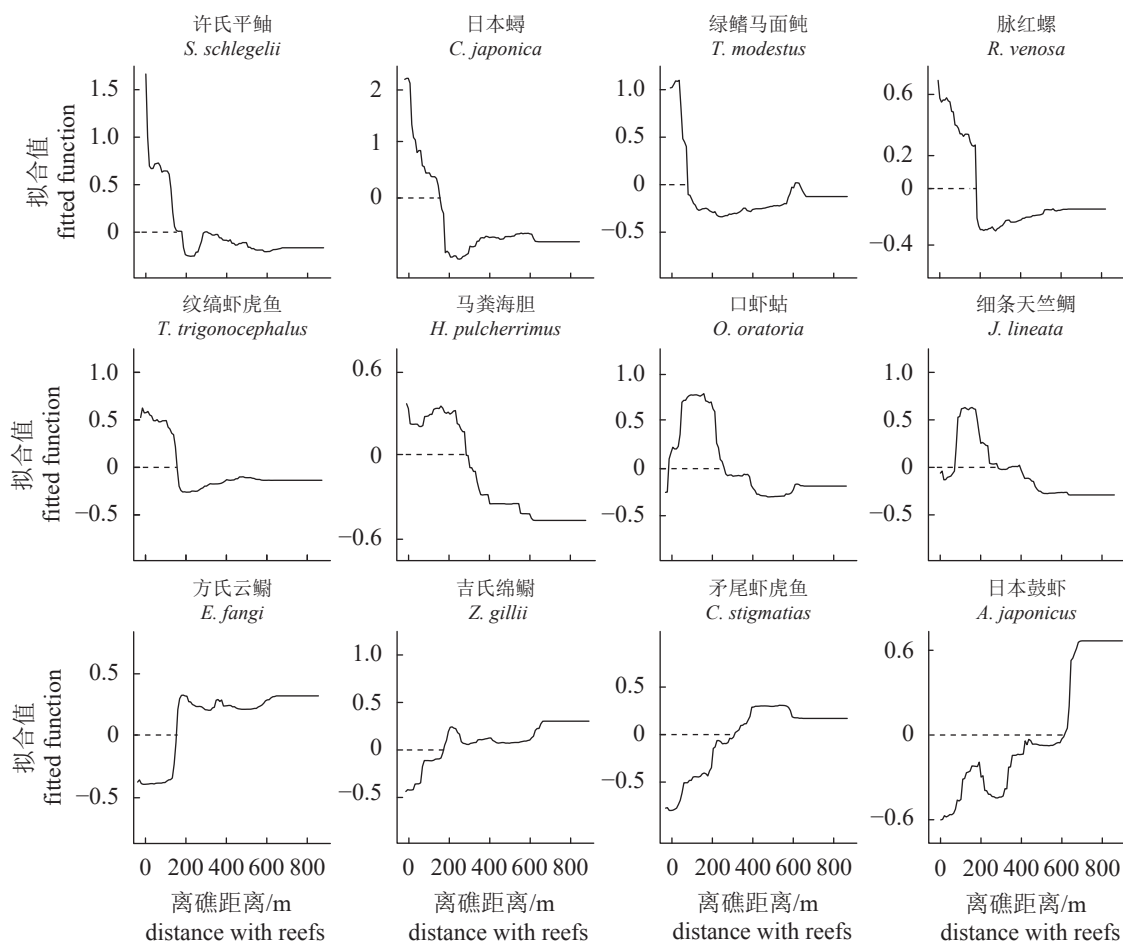


图 4 各物种出现/不出现与离礁距离的响应关系

Fig. 4 Response relationships between species with presence/absence forms and the distance with artificial reefs

体长、体重 对常见种的体长、体重数据进行对数转换 $\lg(x+1)$ ^[20], 标准化后的数据与环境数据进行模型拟合。细条天竺鲷、矛尾虾虎鱼、大泷六线鱼、日本蟳的模型拟合效果较好 ($cv\ correlation > 0.4$, 表 3)。结果显示, 离礁距离越近, 物种的体长越长、体重越大; 离礁距离越远, 物种的体长越短、体重越小(图 5)。

丰富度 群落丰富度与环境因子的拟合效果较好 ($cv\ correlation > 0.4$, 表 3)。丰富度在 0~225 m 的范围内拟合值大于 0, 225~879 m 范围内拟合值小于 0(图 6)。丰富度对离礁距离的响应表现出了强烈的空间变化, 靠近人工鱼礁(0~175 m)物种丰富度处于较高的平稳水平, 随着距离的增加丰富度下降(175~275 m)再上升(275~400 m), 之后趋于平稳(400~879 m)。

2.4 各物种空间分布预测

提取各站位对应的物种出现预测概率进行反距离加权 (inverse distance weighted, IDW) 插

值^[21], 得到每一个物种在海域内的空间分布情况, 结果显示, 可将物种分为 3 种类型, 第一类包括许氏平鲉、日本蟳、绿鳍马面鲀、脉红螺、纹缟虾虎鱼和马粪海胆, 均呈现以礁区为中心向外逐渐降低的趋势, 如许氏平鲉由中心区域出现概率 54% 逐渐向四周扩散降低到 40%。第二类包括口虾蛄和细条天竺鲷, 以礁区为中心向四周一段距离后呈现先升高后降低的趋势, 如口虾蛄在人工鱼礁区出现概率为 10%, 向四周出现概率逐渐增加至 28%, 后随距离增加逐渐降低。第三类包括方氏云鲷、吉氏绵鲷、矛尾虾虎鱼和日本鼓虾, 呈现以礁区为中心向外逐渐升高的趋势, 如矛尾虾虎鱼在礁区出现概率较低, 向外由 10% 升高到 32%(图 7)。

根据其他学者对各物种栖息地偏好分析的结果表明, 大泷六线鱼、许氏平鲉、日本蟳、脉红螺、口虾蛄和绿鳍马面鲀具有明显的礁区偏好, 其余物种更偏好栖息于泥沙底质(表 5)。结合本研究中物种在海域内的空间分布插值结

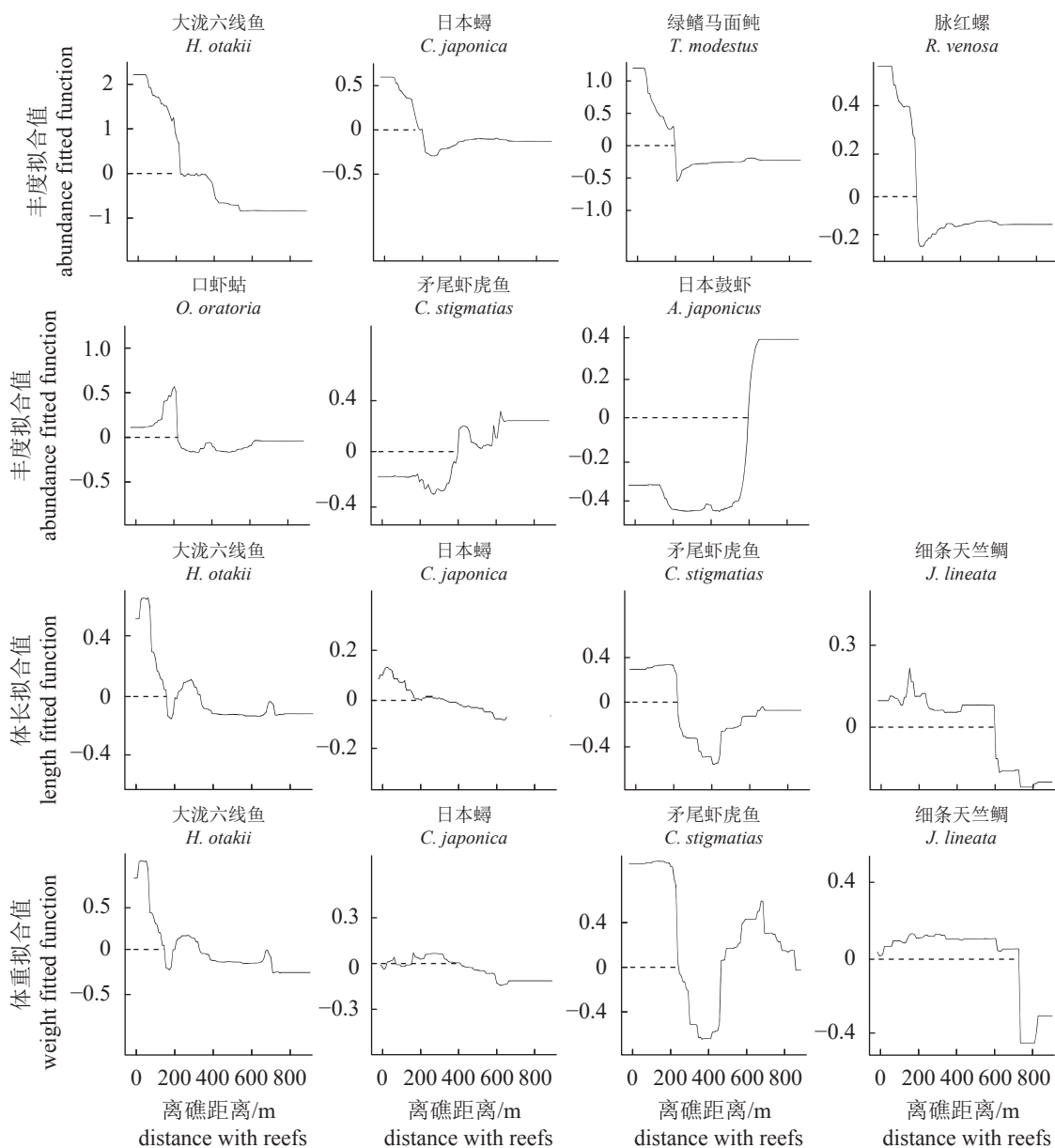


图5 各物种丰度、体长、体重与离礁距离响应关系

Fig. 5 Response relationships between the abundance, length and weight of species and the distance with artificial reefs

果, 可以将人工鱼礁周围物种分为3种类型: 第一种为恋礁型, 生活在人工鱼礁周围0~225 m内, 离礁距离越小, 该类型物种出现概率越大, 丰度越高。第二种为中间型, 对离礁距离的响应呈钟形, 在离人工鱼礁约50 m范围内分布较少, 随离礁距离增加逐渐升高, 达到峰值后逐渐下降, 离礁375 m时拟合值降为0。第三种为离礁型, 该类型物种在0~325 m内预测分布概率较低, 随离礁距离的增加出现概率也随之上升(表6)。

预测概率堆叠面积图显示, 恋礁型物种分

布在离礁距离0~375 m内, 中间型物种分布在离礁距离50~375 m内, 离礁型物种分布在离礁距离225~879 m内(图8-a)。以恋礁型物种分布的最远距离与离礁型物种分布的最近距离为依据, 判断人工鱼礁的影响范围在225~375 m。丰度在0~225 m内处于较高水平(图8-b), 体长较长、体重较大的区域均在离礁0~225 m内(图8-c, d)。

3 讨论

本研究表明, 随离礁距离的增加, 各物种

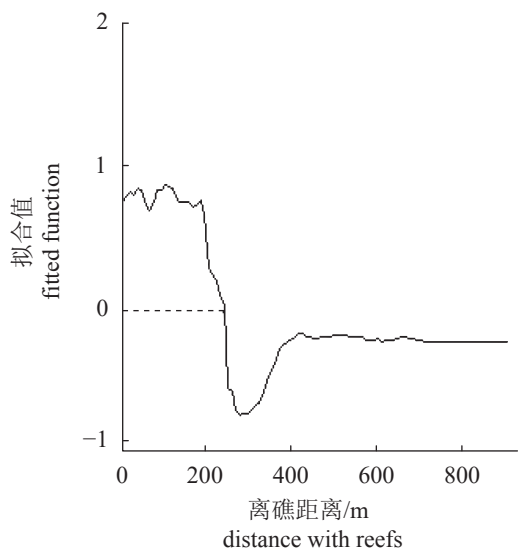


图 6 群落丰富度与离礁距离响应关系

Fig. 6 Response relationship between community richness and the distance with artificial reefs

的空间分布特点不同 (图 8)。结合各物种的栖息地偏好特点 (表 5) 与人工鱼礁对底层生物的聚

集效应^[35-36], 本研究将人工鱼礁周围常见种分为 3 种类型: 恋礁型、中间型和离礁型。大泷六线鱼、许氏平鲈、日本鳎、脉红螺、绿鳍马面鲀、纹缟虾虎鱼和马粪海胆为恋礁型物种, 聚集于人工鱼礁周围。大泷六线鱼和许氏平鲈均为恋礁型鱼类^[37-38], 张硕等^[22]进行人工鱼礁模型诱集实验, 结果表明大泷六线鱼和许氏平鲈对鱼礁有积极响应。日本鳎、脉红螺和马粪海胆均偏好岩礁、石块的生境。Yu 等^[39-40]研究表明, 脉红螺、日本鳎为人工鱼礁区绝对优势种。Yu 等^[41]基于物种原型对人工鱼礁近底层生物进行分类, 结果表明绿鳍马面鲀偏好生活在人工鱼礁周围, 张良成^[28]研究表明纹缟虾虎鱼偏好生活在沙石岩礁底质的浅海中。人工鱼礁的投放会改变海底的地形地貌, 为脉红螺和马粪海胆等提供良好的附着场所。同时, 其产生的上升流和背涡流还能够将海底有机物及营养盐带入海水表层, 促进海洋浮游生物繁殖, 提高该海域初级生产力, 为恋礁型物种提供充足

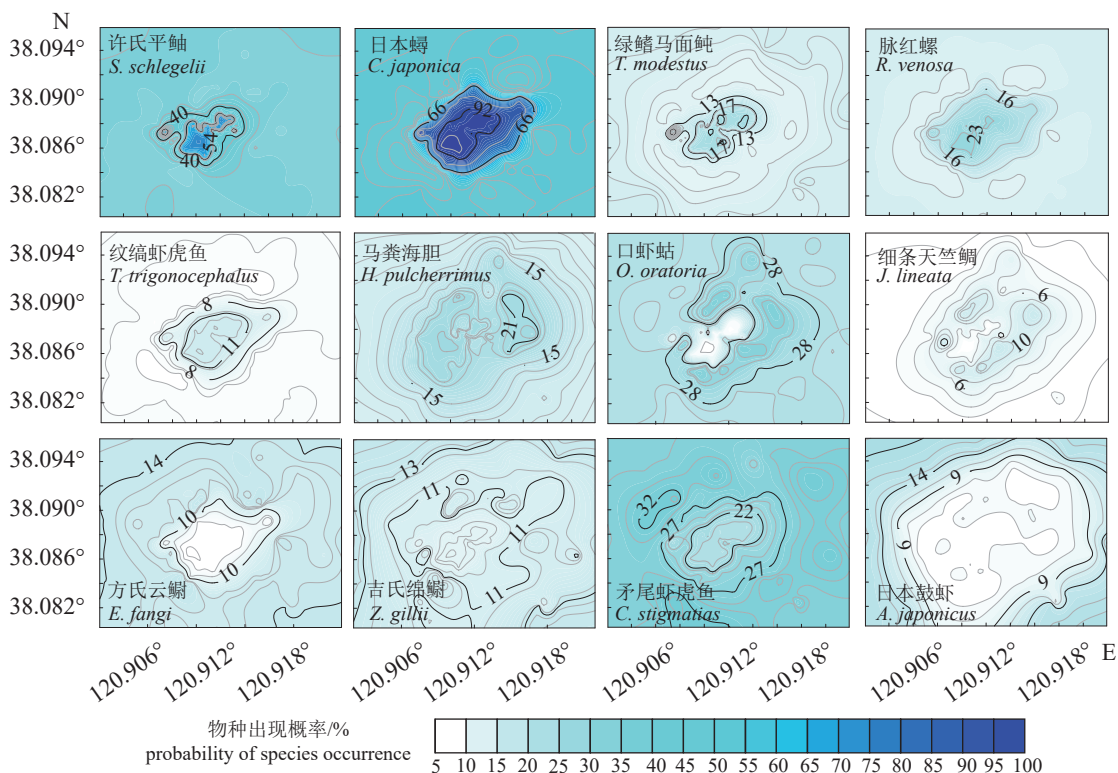


图 7 各物种出现概率空间分布图

图中数字为物种出现概率。

Fig. 7 Spatial distribution map of the occurrence probability of each species

The numbers in the figure represent the occurrence probability of species.

表 5 各物种栖息地偏好

Tab. 5 Habitat preference of each species

| 物种 species | 栖息地偏好 habitat preference |
|--------------------------------|--|
| 大泷六线鱼 <i>H. otakii</i> | 栖息于沿岸及岛屿岩礁附近, 行为学实验中大泷六线鱼喜欢栖息在水槽两端的角落或侧壁 ^[22] |
| 许氏平鲉 <i>S. schlegelii</i> | 恋礁型鱼类, 行为学实验中许氏平鲉喜欢栖息在水槽两端的角落或侧壁 ^[22] |
| 日本鳎 <i>C. japonica</i> | 栖息于有水草或泥沙的水底或潜伏石下, 有研究表明日本鳎是人工鱼礁群落优势种 ^[23-25] |
| 绿鳍马面鲀 <i>T. modestus</i> | 近海砂泥底层鱼类 ^[26] |
| 脉红螺 <i>R. venosa</i> | 生活在数米或十余米水深的浅海泥沙碎贝壳质海底 ^[24, 27] |
| 纹缟虾虎鱼 <i>T. trionocephalus</i> | 偏好于沙石区和岩礁底质的浅海中 ^[28] |
| 马粪海胆 <i>H. pulcherrimus</i> | 栖息在潮间带到水深4 m的砂砾底海藻繁茂的岩礁间, 常藏在石下或石缝内 ^[29] |
| 口虾蛄 <i>O. oratoria</i> | 栖居于浅海泥底的U型洞穴中, 石砾底及礁石缝中也有分布 ^[30] |
| 细条天竺鲷 <i>J. lineata</i> | 栖息于泥沙质海底 ^[31-32] |
| 方氏云鳎 <i>E. fangi</i> | 泥沙底质水域的底层 ^[31] |
| 吉氏绵鳎 <i>Z. gillii</i> | 多匍匐于海底 ^[31] |
| 矛尾虾虎鱼 <i>C. stigmatias</i> | 栖息于河口咸、淡水滩涂淤泥底质水域 ^[33] |
| 日本鼓虾 <i>A. japonicus</i> | 生活于泥沙质地的浅海 ^[34] |

表 6 各类型物种不同指标下的分布范围

Tab. 6 Distribution scope of various types species based on different indexes

| 物种类型 species types | 出现/不出现 presence/absence | 丰度 abundance | 体长 length | 体重 weight | 丰富度 richness |
|-----------------------|----------------------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|
| 恋礁型 | 0~375 | 0~225 | 0~175 | 0~575 | 0~225 |
| 中间型 | 50~375 | 0~225 | 0~525 | 0~625 | |
| 离礁型 | 325~879 | 325~879 | 0~200 | 0~225 | |

的食物来源^[2]。口虾蛄和细条天竺鲷为中间型物种, 但其分布范围与恋礁型物种存在一定程度的重合, 可能是由于物种间捕食和竞争关系导致。张荣良^[42] 研究报道口虾蛄和细条天竺鲷为恋礁型物种的饵料生物。方氏云鳎、吉氏绵鳎、矛尾虾虎鱼和日本鼓虾为离礁型物种, 可能与其栖息地偏好有关, 有学者指出这些物种偏好生活于泥沙底质^[31, 33-34]。但在近礁区, 矛尾虾虎鱼的体长和体重更大, 说明人工鱼礁区为生物的生长发育提供了更优越的条件。由于各生物类型所包含的物种各不相同, 群落丰富度对离礁距离的响应表现出差异性, 在离礁距离175~400 m, 群落丰富度随离礁距离的增加呈先下降后上升的趋势(图 6): ①离礁距离175~275 m, 恋礁型物种受到人工鱼礁复杂栖息环境、饵料生物、流场效应等因素的吸引^[43-44], 出现概率随离礁距离的增加逐渐降低且物种数目逐渐下降, 群落丰富度降低。②离礁距离275~400 m, 恋礁型物种丰度和丰富度下降^[43], 捕食

与竞争压力减小^[42], 受泥沙底质的吸引^[31, 33-34], 人工鱼礁流场效应减弱, 中间型物种出现概率增加, 离礁型物种出现, 中间型和离礁型物种数目增加, 3 种类型物种分布范围重合, 群落丰富度升高。

物种出现/不出现、丰度、丰富度和体长、体重等指标的空间分布模式是制订渔业资源管理决策的基础。dos Santos 等^[45] 利用丰度拟合广义加性模型(GAM)的实验结果表明, 鱼类在距离礁区0和50 m处的丰度远高于距离礁区300 m处。Smith等^[46] 基于广义线性混合模型(GLMM)拟合物种丰度与离礁距离的关系, 结果表明人工鱼礁影响鱼类丰度, 且鱼类在离礁0~50 m时丰度较高。Froeschke等^[47] 使用BRT模型对丰度模式和环境因素对资源量补充的影响进行探索, 了解了渔业资源减少的机制。Francis等^[11] 基于BRT模型对河口区仔稚鱼丰度、丰富度、出现/不出现与站位进行拟合预测分布, 为保护河口区物种多样性提供理论支撑。Yu等^[41] 利用物种出现/不出现指标与环境因子

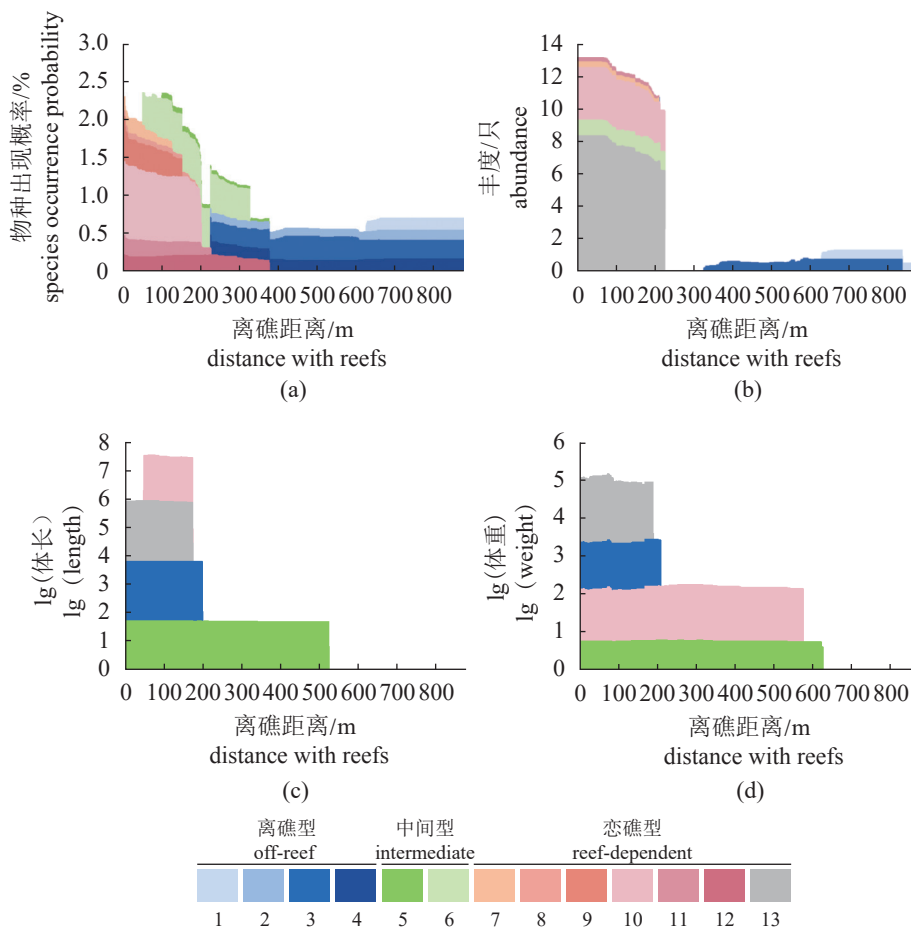


图 8 预测概率堆叠面积图

(a) 物种出现预测概率堆叠面积图, (b) 丰度预测概率堆叠面积图, (c) 物种体长预测概率堆叠面积图, (d) 物种体重预测概率堆叠面积图。
 1. 日本鼓虾, 2. 吉尾绵鲷, 3. 矛尾虾虎鱼, 4. 方氏云鲷, 5. 细条天竺鲷, 6. 口虾鲷, 7. 绿鳍马面鲀, 8. 纹缟虾虎鱼, 9. 许氏平鲈, 10. 日本鲷, 11. 脉红螺, 12. 马粪海胆, 13. 大泷六线鱼。

Fig. 8 Stacked area chart of predicted probability

(a) stacked area chart of species occurrence predicted probability, (b) stacked area chart of abundance predicted probability, (c) stacked area chart of species length predicted probability, (d) stacked area chart of species weight predicted probability. 1. *A. japonicus*, 2. *Z. gillii*, 3. *C. stigmatias*, 4. *E. fangi*, 5. *J. lineata*, 6. *O. oratoria*, 7. *T. modestus*, 8. *T. trionocephalus*, 9. *S. schlegelii*, 10. *C. japonica*, 11. *R. venosa*, 12. *H. pulcherrimus*, 13. *H. otakii*.

的关系将鱼礁区底层游泳生物划分为 6 个群落功能组。Parra 等^[43]应用 GAM 模型将 8 种重要经济鱼类的出现/不出现和相对丰度数据与环境变量进行拟合, 预测物种分布。Becker 等^[48]使用广义加性混合模型 (GAMMs) 拟合物种原型及部分物种的丰度、出现/不出现与鱼礁群间距的关系, 结果表明, 鱼礁组间隔 50 m 时连通性较好。物种出现/不出现、丰度、丰富度和多样性等指标的运用为研究人工鱼礁影响范围作出了许多贡献。本研究使用 BRT 模型, 通过对物种出现/不出现、丰度、丰富度、体长、体重等指标进行综合分析, 结果表明人工鱼礁对底层游泳生物的影响边界范围约为 200~400 m, 在此范围内物种丰度和丰富度较高、体长和体重

也处于较高水平, 但也需要考虑人工鱼礁对偏好软底质类型生物分布的影响, 人工鱼礁对离礁型物种的影响范围为离礁 325 m, 在此范围以外, 离礁型物种的出现概率和丰度较高。

SDM 在保护生物学中已经应用于研究物种在陆地和海洋系统中的分布和潜在栖息地中^[49-50]。研究表明使用 SDM 模型预测人工鱼礁区鱼类的分布需要相对较大的海域空间、充足的生物学数据和栖息地环境数据。Scott 等^[35]和 dos Santos 等^[45]采样站位较少, 只通过人为确定的离礁距离描述丰度和丰富度的变化, 结果只能反映出采样点之间的变化趋势, 无法代表整个区域内物种对离礁距离的响应。车由岛人工鱼礁区栖息地空间结构较为复杂, 渔业资源养护效果

较好, 物种多样性和生物资源量较高, 为 SDM 模型的构建提供了良好的数据支撑。本研究使用 SDM 进行分析, 将丰富度、物种出现概率、丰度、体长和体重与离礁距离进行拟合, 得到响应关系图, 为分析人工鱼礁生物影响范围提供了依据。此外, 海上作业海况复杂、环境恶劣, 受天气影响较大, 生物学调查难以全部覆盖, 因此, SDM 可以为进一步探索和发现物种分布提供参考, 为物种保护措施的制订提供科学依据。

本研究利用物种分布模型拟合了常见底层生物与环境变量之间的响应关系, 初步探究了人工鱼礁对底层游泳生物的影响范围, 可以为车由岛海域人工鱼礁区管理、渔业资源养护和开发利用提供数据支撑。

参考文献 (References):

- [1] Abelson A. Artificial reefs vs coral transplantation as restoration tools for mitigating coral reef deterioration: benefits, concerns, and proposed guidelines[J]. *Bulletin of Marine Science*, 2006, 78(1): 151-159.
- [2] 张萌萌, 刘岳, 解涛, 等. 威海西霞口海洋牧场鱼礁区中许氏平鲷的生长、死亡及合理利用 [J]. *水产学报*, 2019, 43(9): 1925-1936.
- Zhang M M, Liu Y, Xie T, *et al.* Growth, mortality and reasonable utilization of *Sebastes schlegelii* in the artificial reef area of Weihai, Shandong Province[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1925-1936 (in Chinese).
- [3] Yamamoto K C, de Carvalho Freitas C E, Zuanon J, *et al.* Fish diversity and species composition in small-scale artificial reefs in Amazonian floodplain lakes: refugia for rare species?[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 67: 165-170.
- [4] Jardewski C, de Almeida T C M. Fish assemblage on artificial reefs in south Brazilian coast[J]. *Journal of Coastal Research*, 2006, 39: 1210-1214.
- [5] 王新萌, 盛化香, 刘淑德, 等. 莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区鲷资源分布特征及其与环境因子的相关性分析 [J]. *水产学报*, 2019, 43(9): 1914-1924.
- Wang X M, Sheng H X, Liu S D, *et al.* Distribution characteristics of *Liza haematocheila* and its relationship with environmental factors in Furongdao artificial reef zones, Laizhou Bay, China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1914-1924 (in Chinese).
- [6] Guisan A, Thuiller W, Zimmermann N E. Habitat suitability and distribution models: with applications in R[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [7] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法 [J]. *生态学报*, 2015, 35(2): 557-567.
- Xu Z L, Peng H H, Peng S Z. The development and evaluation of species distribution models[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 557-567 (in Chinese).
- [8] 郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 等. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势 [J]. *地球科学进展*, 2020, 35(12): 1292-1305.
- Guo Y L, Zhao Z F, Qiao H J, *et al.* Challenges and development trend of species distribution model[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(12): 1292-1305 (in Chinese).
- [9] 项涛, 董响红, 郭超, 等. 基于随机森林模型预测气候变化对黄颡鱼适生区的影响 [J]. *水生生物学报*, 2019, 43(6): 1262-1270.
- Xiang T, Dong X H, Guo C, *et al.* The impacts of climate change on the distribution of *Pelteobagrus fulvidraco* by random forest model[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(6): 1262-1270 (in Chinese).
- [10] Thiault L, Weekers D, Curnock M, *et al.* Predicting poaching risk in marine protected areas for improved patrol efficiency[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 254: 109808.
- [11] Francis M P, Morrison M A, Leathwick J, *et al.* Predicting patterns of richness, occurrence and abundance of small fish in New Zealand estuaries[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2011, 62(11): 1327-1341.
- [12] Elith J, Graham C H, Anderson R P, *et al.* Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data[J]. *Ecography*, 2006, 29(2): 129-151.
- [13] Froeschke B F, Tissot P, Stunz G W, *et al.* Spatiotemporal predictive models for juvenile southern flounder in Texas estuaries[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2013, 33(4): 817-828.
- [14] Lewin W C, Mehner T, Ritterbusch D, *et al.* The influence of anthropogenic shoreline changes on the littoral abundance of fish species in German lowland lakes varying in depth as determined by boosted regression trees[J]. *Hydrobiologia*, 2014, 724(1): 293-306.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范: 第 1 部分: 总则: GB/T 17378.1—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization

- Administration of the People's Republic of China. The specification for marine monitoring—Part 1: General rules: GB/T 17378.1-2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008 (in Chinese).
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范 第 1 部分: 总则: GB/T 12763.1—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for oceanographic survey—Part 1: General: GB/T 12763.1-2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008 (in Chinese).
- [17] Bortone S A, Hastings R W, Oglesby J L. Quantification of reef fish assemblages: a comparison of several *in situ* methods[J]. *Northeast Gulf Science*, 1986, 8(1): 1-22.
- [18] Oliver M A, Webster R. A tutorial guide to geostatistics: computing and modelling Variograms and Kriging[J]. *CATENA*, 2014, 113: 56-69.
- [19] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802-813.
- [20] Sadio O, Simier M, Ecotin J M, *et al.* Effect of a marine protected area on tropical estuarine fish assemblages: comparison between protected and unprotected sites in Senegal[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 116: 257-269.
- [21] 严立文, 黄海军, 刘艳霞. 基于 GIS 空间分析的海底表层沉积物粒度分布特征插值研究 [J]. *海洋科学*, 2010, 34(1): 58-64.
- Yan L W, Huang H J, Liu Y X, *et al.* GIS-based analysis of spatial interpolations of sediments grain size in Heini Bay[J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(1): 58-64 (in Chinese).
- [22] 张硕, 孙满昌, 陈勇. 人工鱼礁模型对大泷六线鱼和许氏平鲈幼鱼个体的诱集效果 [J]. *大连水产学院学报*, 2008, 23(1): 13-19.
- Zhang S, Sun M C, Chen Y. The attractive effects of different structural artificial reef models on juvenile Schlegel's rockfish *Sebastes schlegelii* and fat greenling *Hexagrammos otakii*[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2008, 23(1): 13-19 (in Chinese).
- [23] 于浩林, 方光杰, 周广军, 等. 人工鱼礁区不同底质对底栖游泳生物群落特征的影响 [J]. *水产学报*, 2023, 47(9): 099306.
- Yu H L, Fang G J, Zhou G J, *et al.* The effects of different substrate types on community characteristics of benthic swimming organisms in the artificial reef area[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(9): 099306 (in Chinese).
- [24] 杨超杰, 吴忠鑫, 刘鸿雁, 等. 基于 Ecopath 模型估算莱州湾朱旺人工鱼礁区日本鳎、脉红螺捕捞策略和刺参增殖生态容量 [J]. *中国海洋大学学报*, 2016, 46(11): 168-177.
- Yang C J, Wu Z X, Liu H Y, *et al.* The fishing strategy of *Charybdis japonica* and *Rapana venosa* and the carrying capacity of *Apostichopus japonicus* in Zhuwang, Laizhou artificial reef ecosystem based on Ecopath Model[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(11): 168-177 (in Chinese).
- [25] 方光杰, 孙利元, 唐衍力, 等. 基于刺网和地笼渔获物的人工鱼礁区资源丰度比较研究 [J]. *中国海洋大学学报*, 2018, 48(S1): 23-33.
- Fang G J, Sun L Y, Tang Y L, *et al.* A comparative study on fishery resource of artificial reefs based on gillnet and cage catches[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(S1): 23-33 (in Chinese).
- [26] 苏锦祥, 李春生. 中国动物志 硬骨鱼纲 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- Su J X, Li C S. Chinese fauna Osteichthyes[M]. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese).
- [27] 刘德经. 海水贝类养殖技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 174-176.
- Liu D J. Seawater shellfish culture technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 174-176 (in Chinese).
- [28] 张良成. 莱州湾虾虎鱼群落结构及渔业生物学研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- Zhang L C. Study on the community structure and fishery biological characteristics of Gobioidae in Laizhou Bay[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019 (in Chinese).
- [29] 赵汝翼, 赵大东. 大连沿海习见无脊椎动物 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1965: 136-138.
- Zhao R Y, Zhao D D. Invertebrates in Dalian coast[M]. Beijing: China Higher Education Press, 1965: 136-138 (in Chinese).
- [30] 王波, 张锡烈, 孙丕喜. 口虾蛄的生物学特征及其人工苗种生产技术 [J]. *黄渤海海洋学报*, 1998, 16(2): 65-73.
- Wang B, Zhang X L, Sun P X. On biological characters and artificial seedling rearing techniques of mantis shrimp (*Oratosquilla oratoria*)[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1998, 16(2): 65-73 (in Chinese).
- [31] 倪勇, 伍汉霖. 江苏鱼类志 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 307-309, 621-624.
- Ni Y, Wu H L. Fishes of Jiangsu Province[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 307-309, 621-624 (in Chinese).

- [32] 庄平, 王幼槐, 李圣法, 等. 长江口鱼类 [M]. 上海: 上海科技出版社, 2006.
Zhuang P, Wang Y H, Li S F, *et al.* Fishes in the Yangtze estuary[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2006 (in Chinese).
- [33] 李明德. 天津鱼类志 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2011: 158-159.
Li M D. Fauna of fishes in Tianjin[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 2011: 158-159 (in Chinese).
- [34] 宋海棠, 俞存根, 薛利建, 等. 东海经济虾蟹类 [M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 71.
Song H T, Yu C G, Xue J L, *et al.* Economic shrimp and crab of East Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006: 71 (in Chinese).
- [35] Scott M E, Smith J A, Lowry M B, *et al.* The influence of an offshore artificial reef on the abundance of fish in the surrounding pelagic environment[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2015, 66(5): 429-437.
- [36] Reeds K A, Smith J A, Suthers I M, *et al.* An ecological halo surrounding a large offshore artificial reef: sediments, infauna, and fish foraging[J]. *Marine Environmental Research*, 2018, 141: 30-38.
- [37] 冯昭信, 韩华. 大泷六线鱼资源合理利用的研究 [J]. 大连水产学院学报, 1998, 13(2): 24-28.
Feng Z X, Han H. Rational utilization of *Hexagrammos otakii* resources[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 1998, 13(2): 24-28 (in Chinese).
- [38] 唐衍力, 解涛, 于浩林, 等. 环境与摄食对山东省近海鱼礁区不同体长许氏平鲷分布的影响 [J]. 水产学报, 2020, 44(6): 924-935.
Tang Y L, Xie T, Yu H L, *et al.* Effects of environment and feeding factors on the distribution of different body lengths of *Sebastes schlegelii* in the reef areas of Shandong Province[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(6): 924-935 (in Chinese).
- [39] Yu M J, Liu C D, Tang Y L, *et al.* Effects of escape vents on the size selection of whelk (*Rapana venosa*) and Asian paddle crab (*Charybdis japonica*) in the small-scale pot fishery of the Yellow Sea, China[J]. *Hydrobiologia*, 2022, 849(14): 3101-3115.
- [40] Yu M J, Zhang L Y, Liu C D, *et al.* Improving size selectivity of round pot for *Charybdis japonica* by configuring escape vents in the Yellow Sea, China[J]. *PeerJ*, 2021, 9: e12282.
- [41] Yu H L, Fang G J, Rose K A, *et al.* Examining epibenthic assemblages associated with artificial reefs using a species archetype approach[J]. *Marine and Coastal Fisheries*, 2022, 14(3): e10206.
- [42] 张荣良. 烟台近岸人工鱼礁与自然岩礁食物网结构与功能对比研究 [D]. 烟台: 中国科学院大学 (中国科学院烟台海岸带研究所), 2021.
Zhang R L. The comparative study of the food web structure and function between the artificial and natural reefs in the nearshore of Yantai[D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2021 (in Chinese).
- [43] Parra H E, Pham C K, Menezes G M, *et al.* Predictive modeling of deep-sea fish distribution in the Azores[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2017, 145: 49-60.
- [44] Colloca F, Carpentieri P, Balestri E, *et al.* A critical habitat for Mediterranean fish resources: shelf-break areas with *Leptometra phalangium* (Echinodermata: Crinoidea)[J]. *Marine Biology*, 2004, 145(6): 1129-1142.
- [45] dos Santos L N, Brotto D S, Zalmon I R. Fish responses to increasing distance from artificial reefs on the Southeastern Brazilian Coast[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2010, 386(1-2): 54-60.
- [46] Smith J A, Cornwell W K, Lowry M B, *et al.* Modelling the distribution of fish around an artificial reef[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2017, 68(10): 1955-1964.
- [47] Froeschke J T, Froeschke B F. Spatio-temporal predictive model based on environmental factors for juvenile spotted seatrout in Texas estuaries using boosted regression trees[J]. *Fisheries Research*, 2011, 111(3): 131-138.
- [48] Becker A, Smith J A, Taylor M D, *et al.* Distribution of pelagic and epi-benthic fish around a multi-module artificial reef-field: close module spacing supports a connected assemblage[J]. *Fisheries Research*, 2019, 209: 75-85.
- [49] Kumar S, Stohlgren T J. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia[J]. *Journal of Ecology and Natural Environment*, 2009, 1(4): 94-98.
- [50] Sheehan K L, Esswein S T, Dorr B S, *et al.* Using species distribution models to define nesting habitat of the eastern metapopulation of double-crested cormorants[J]. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(1): 409-418.

Spatial distribution of benthic swimming organisms in Cheyou Island artificial reefs area based on species distribution models

GE Chang¹, YU Haolin², LIU Shude³, TANG Yanli^{1*}, YU Mengjie¹,
WEI Wenyu¹, SHENG Huaxiang¹

1. Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266003, China;

3. Shandong Fisheries Development and Resources Conservation Center, Yantai 264003, China

Abstract: Artificial reefs positively affect on creating habitat, improving the water ecological environment, and enhancing biodiversity. The performance of artificial reef deployment is closely related to its biological influence scope. A total of eleven cruises of field surveys were conducted from 2019 to 2021 in the artificial reefs to explore the impact of artificial reefs on the distribution of benthic swimming species. Trap and visual census methods were both used to sample benthic swimming organisms. The response relationships between biological indicators (e.g., occurrence probability, abundance, body length and weight of individual common species, and community richness) and the distance with artificial reefs were explored based on species distribution models (SDMs). This study summarized the influence scope of artificial reefs and fitted the spatial distribution of the occurrence probability for each species to verify the scope. The results indicated species could be divided into reef-dependent, intermediate, and off-reef species types according to the response curve between species occurrence probability and the distance with reefs. The reef-dependent species preferred to locate at 0-375 m away from the reefs, and the intermediate and off-reef species types were 50-375 m and 225-879 m, respectively. The abundance of reef-dependent and intermediate species types was higher at 0-225 m away from reefs, while that of reef-off species was higher at 325-879 m. The body length and weight of reef-dependent and reef-off species were more significant at 0-225 m away from the reefs, while those of intermediate species were larger at 0-525 m. The community richness was higher at 0-225 m. The spatial distribution pattern of each species was consistent with the response relationships between indicators and the distance with reefs. This study revealed the changes in response characteristics of different benthic swimming organisms to the distance from the reefs, explored the influence scope of artificial reefs under different indicators, and provided a reference for the construction, planning, and management of artificial reef areas.

Key words: artificial reefs; benthic swimming organisms; biological influence scope; distance with reefs; species distribution models; Cheyou Island

Corresponding author: TANG Yanli. E-mail: tangyanli@ouc.edu.cn

Funding projects: Investigation and Surveillance of Offshore Fishery Resources in Shandong (37000022P11000111802T)