

# 基于生物资源的万山海洋牧场生境适宜性评估

初建松<sup>1</sup>, 郑卫东<sup>1</sup>, 孙利元<sup>2</sup>, 彭道民<sup>1</sup>, 索安宁<sup>3</sup>, 朱玉贵<sup>4</sup>

(1. 中国海洋大学 海洋生命学院, 山东 青岛 266003; 2. 山东省渔业发展和资源养护总站, 山东 烟台 264003; 3. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州, 510301; 4. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003)

**摘要:** 万山群岛海域生态环境日益恶化、渔业资源持续衰退, 因此建设万山群岛海洋牧场, 修复海域生态环境、实现渔业资源可持续利用迫在眉睫。针对现阶段基于海洋生物资源的海洋牧场适宜性评估的研究较少, 本研究利用渔业资源调查和全球物种数据库记录数据及 13 个环境因素数据, 采用物种分布模型 MaxEnt 对选择的白姑鱼、日本金线鱼、红星梭子蟹和浅缝骨螺潜在分布区进行预测, 探讨海洋生物地理分布与海洋环境因素之间的关系进而进行万山海洋牧场生境适宜性评估, 结果表明: (1)各模型 AUC 值均大于 0.9, 说明构建的模型对这些物种潜在分布的模拟效果较好, 后续可采用 MaxEnt 模型对 4 种生物的栖息地分布区进行预测; (2)海底浮游植物密度、海底温度以及海底硅酸盐浓度是影响这 4 种海洋生物栖息地分布的关键环境因子; (3)基于该 4 种海洋物种 MaxEnt 模型的 HSI 分布区所存在重叠区域来看, 海洋牧场拟建设区域应为纬度 21.85°N~22.15°N, 经度 113.6°E~114.2°E。研究结果可为万山海洋牧场规划和建设提供科学依据。

**关键词:** 海洋牧场; 万山群岛; 适宜性评估; MaxEnt 模型

中图分类号: Q958; S931.41 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2024)1-0075-10

DOI: 10.11759/hyxx20230421002

海洋牧场是基于生态学原理, 充分利用自然生产力, 运用现代工程技术和管理模式, 通过生境修复和人工增殖, 在适宜海域构建的兼具环境保护、资源养护和渔业持续产出功能的生态系统<sup>[1]</sup>, 建设海洋牧场被广泛视为是恢复海洋渔业资源水平的重要途径和改善海洋生态环境的重要举措。万山群岛海域位于珠江口与南海交汇处, 总面积 2 600 km<sup>2</sup>, 处于咸淡水交界处。大量陆源营养物质随珠江流入该海域, 又受洋流交汇影响, 其上升流把大量海底沉积的营养物质带入水体中, 导致初级生产力高, 饵料生物丰富, 是海洋生物觅食和栖息的理想场所<sup>[2]</sup>。

历史上万山群岛的万山渔场是我国著名渔场之一, 但万山群岛海域生态环境日益恶化, 渔业资源持续衰退已经不能满足我国经济快速发展和生态环境保护的需求。因此建设万山群岛海洋牧场, 修复海域生态环境、实现渔业资源可持续利用迫在眉睫。目前, 我国海洋牧场适宜性研究尚处于探索阶段, 已有的海洋牧场适宜性即选址研究大多关注于地理条件、物理化学条件等层面<sup>[3-8]</sup>, 如耿文倩等<sup>[8]</sup>选取水深、流速、底质类型、水质与沉积物质量、叶绿素 *a* 浓度与富营养化状况等对烟台北部海洋牧场的选址进行了分析; 谢

笑艳等<sup>[3]</sup>从海岸线稳定性、海洋功能区划、海洋生态红线、养殖水域滩涂规划、海洋工程和设施等 5 个方面选取 34 个指标作为海洋牧场选址适宜性评价的因素。海洋牧场适宜性评估需要综合考虑多种因素, 除了地理条件、物理化学条件等层面, 海洋生物与生态环境之间的关系也是需要考的重要因素。鲜有研究针对海洋生物资源与生态环境之间的关系探究海洋牧场生境适宜性问题, 海洋生物与生态环境之间的关系对海洋牧场的生产效益和可持续性发展具有重要影响。例如, 有些海洋生物对水温、水质、光照、盐度等环境因素有着非常明显的适应性, 它们只能在特定的环境下才能生长和繁殖。如果环境条件不适宜, 这些海洋生物的数量和生长速度就会受到影响, 进而影响养殖效益。因此, 在海洋牧场选址时需要充分考虑生物与环境之间的匹配度, 进而选择适宜的海域建

收稿日期: 2023-04-21; 修回日期: 2023-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(42176234)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42176234]

作者简介: 初建松(1970—), 男, 山东烟台人, 教授, 研究方向为海洋生态建模, E-mail: oucjs@ouc.edu.cn; 朱玉贵(1980—), 通信作者, 男, 江苏泗阳人, 教授, 研究方向为渔业经济与管理, E-mail: zhuyugui@ouc.edu.cn

设海洋牧场,故基于万山群岛海域建设海洋牧场的需求,本研究拟借助物种分布模型 MaxEnt 对万山海域的海洋牧场生境适宜性进行分析,在探讨海洋生物地理分布与环境因子关系的基础上,寻找该海域适宜多目标生物的潜在分布区,从而推进海洋牧场基于生物资源的规划与选址,以期万山海域海洋牧场建设选址提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 目标物种与环境因子选择

#### 1.1.1 目标海洋生物选择

本研究确定 4 个物种,分别是白姑鱼(*Pennahia argentata*)、日本金线鱼(*Nemipterus japonicus*)、红星梭子蟹(*Portunus sanguinolentus*)和浅缝骨螺(*Murex trapa*)作为目标生物开展海洋牧场生境适宜性研究,这主要是兼顾到增殖放流(已解决育苗问题:白姑鱼和红星梭子蟹)和人工鱼礁(尚未解决育苗问题:日本金线鱼和浅缝骨螺)建设,结合广东珠江口主要渔业资源种类分布研究<sup>[9-10]</sup>,最终形成一个组合方案,同步解决当前和长远问题。白姑鱼属鲈形目、石首鱼科、白姑鱼属,为暖温性近底层鱼类,广泛分布于印度洋和太平洋西部海域,在中国沿海均有分布,是重要的经济鱼类且产量较高,其次白姑鱼也是 2000 年以后历次珠江口海域渔业资源调查的优势种<sup>[11-12]</sup>。

日本金线鱼属鲈形目、金线鱼科、金线鱼属,主要分布在东海和南海,在食物网中的营养位置较高,既是消费者,又是高级肉食性鱼类重要的摄食对象,在该生态系统的食物网结构稳定、能量流动转化及能量输出等方面起到重要作用<sup>[13]</sup>。红星梭子蟹属梭子蟹科、梭子蟹属,为大型食用经济蟹类,广泛分布于广西、广东、福建和台湾等邻近海域,是西太平洋—印度洋暖水海域最适合养殖和海洋牧场建设的 4 种重要经济蟹类之一<sup>[14-15]</sup>。浅缝骨螺属骨螺科,分布于浙江以南沿海海域,为海底拖网习见的种类及南海海域重要的经济种类<sup>[16]</sup>。

#### 1.1.2 海洋环境因子选择

相关研究表明<sup>[17-22]</sup>,海洋生物资源分布与海洋表面温度(Sea Surface Temperature, SST)、海表面盐度(Sea Surface Salinity, SSS)、叶绿素 *a* 浓度(Chl *a*)、初级生产力(Primary Productivity, PP)、溶解氧浓度(Dissolved Oxygen, DO)等因素有关。本研究根据 4 种目标生物(白姑鱼、日本金线鱼、红星梭子蟹、浅缝骨螺)的生理特性,借鉴以往研究成果且考虑数据的可获得性,收集了 13 个环境变量作为预测目标海洋生物的潜在分布区的环境因子。环境数据集包括地形、物理因子、化学因子、营养盐 4 类(表 1),本研究所选择的海洋生物为近底层和底层物种,故选取的部分指标为是海底环境数据。

表 1 模型中使用的环境变量

Tab. 1 Environmental variables employed in the model

要素	环境因子	符号	单位	来源
地形	水深	Depth	m	NOAA's ETOPO1
物理因子	海底流速	Velocity	m·s <sup>-1</sup>	Bio-ORACLE
	海底温度	SBT	°C	GMED
	海底盐度	SSS		Bio-ORACLE
化学因子	叶绿素 <i>a</i> 质量浓度	Chl <i>a</i>	mg·m <sup>-3</sup>	GMED
	初级生产力	PP	mgC·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup>	GMED
	酸碱度	pH		GMED
	海底浮游植物密度	Phyt	个·m <sup>-3</sup>	Bio-ORACLE
营养盐	海底硝酸盐物质的量浓度	Nitrate	μmol·L <sup>-1</sup>	GMED
	海底磷酸盐物质的量浓度	Phosphate	μmol·L <sup>-1</sup>	GMED
	海底硅酸盐物质的量浓度	Silicate	μmol·L <sup>-1</sup>	GMED
	海底溶解氧质量浓度	DO	mg·L <sup>-1</sup>	GMED
	颗粒有机碳质量浓度	POC	mg·m <sup>-3</sup>	GMED

#### 1.1.3 数据来源

4 种海洋生物物种分布数据来源于 2020 年 12 月在万山群岛海域开展的渔业资源调查和全球物种数

数据库(www.gbif.org 和 www.obis.org)记录数据。调查范围为 21.75°N~22.75°N 和 113.25°E~114.25°E,如图 1 所示。水深来自 NOAA 的 ETOPO1 产品高程数

据,海底流速、海底盐度和海底浮游植物密度数据来自 Bio-ORACLE 环境数据库(www.bio-oracle.org),

其余环境因子数据来自 GMED 环境数据库(gmed.auckland.ac.nz)。



图 1 万山群岛海域及调查站位图

Fig. 1 Map showing the Wanshan Archipelago sea area and the survey stations

## 1.2 模型构建

### 1.2.1 MaxEnt 模型

最大熵模型(Maximum Entropy Model, MaxEnt)是物种分布模型的一种,它是基于最大熵演算方法,能够根据环境因子和物种分布数据,建立环境因子和物种分布之间的函数关系,从而预测物种在新环境条件下的潜在分布范围<sup>[23-24]</sup>。它可以根据该物种分布的不完整信息,预测其在某一范围内的分布,并且适用于数据量小、时间跨度短的数据集<sup>[25]</sup>。

### 1.2.2 模型预处理

将目标生物的分布点的经纬度以.csv 形式输入到 MaxEnt 模型中,环境数据则来自 Bio-ORACLE 和 GMED 等环境数据库数据。由于各个环境数据的空间分辨率不同,统一提取至研究区域边界,并将分辨率重采样至 5'×5'以进行建模分析,通过 5 折交叉验证法用于模型选择。本研究利用 R 软件的 raster 包和 dismo 包完成建模。

### 1.2.3 模型评估

使用受试者工作特征曲线(Receiver operating characteristic curve, ROC)下面积(Area under curve, AUC)用于评估模型的预测性能<sup>[23]</sup>。ROC 曲线以假阳性率为横坐标,真阳性率为纵坐标,根据该曲线下的面积(Area under curve, AUC)值判定模型的精确度<sup>[23]</sup>。当 AUC 在 0~1 时,表示模型预测与发生数据之间的一致性程度<sup>[26]</sup>。当 AUC>0.75 时,表明模型预测效果较好;当 AUC 在 0.9~1.0 时,表明模型预测性能出色<sup>[27-28]</sup>。此外,Maxent 模型有百分比贡献率(Percent contribution)可以用以评估各环境变量对物种分布的重要性,百分比贡献率是指某个环境因子对目标物种分布的影响程度在所有环境因子中所占的比例<sup>[23, 29]</sup>。

### 1.2.4 潜在分布区预测

本研究借鉴以往研究<sup>[30-31]</sup>,将物种分布存在概率定义为栖息地适宜性指数(Habitat Suitability Index,

HSI)。适宜区等级可划分为: 高适宜区( $HSI \geq 0.8$ )、较高适宜区( $0.6 \leq HSI < 0.8$ )、一般适宜区( $0.4 \leq HSI < 0.6$ )、较低适宜区( $0.2 \leq HSI < 0.4$ )及低适宜区( $0 \leq HSI < 0.2$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型准确性评价

白姑鱼、日本金线鱼、红星梭子蟹和浅缝骨螺的 MaxEnt 模型的 AUC 值分别为 0.985、0.980、0.973 和 0.981(表 2)。各 MaxEnt 模型的 AUC 值均大于 0.9, 说明构建的模型对这些物种潜在分布的模拟效果较好, 后续可采用 MaxEnt 模型对 4 种生物的栖息地分布区进行预测。

表 2 各 MaxEnt 模型的 AUC 值

Tab. 2 Area under the curve (AUC) values of each MaxEnt model

物种	AUC
白姑鱼	0.985
日本金线鱼	0.980
红星梭子蟹	0.973
浅缝骨螺	0.981

表 3 各 MaxEnt 模型环境因子百分比贡献率

Tab. 3 Percent contribution of environmental factors by each MaxEnt model

变量	百分比贡献率/%			
	白姑鱼	日本金线鱼	红星梭子蟹	浅缝骨螺
Phyt	49.60	52.40	48.20	46.30
POC	11.80	1.90	5.90	0.00
SBT	9.10	7.90	11.60	2.90
Phosphate	7.90	2.40	6.60	0.30
Silicate	6.50	6.50	7.40	3.00
PP	3.70	3.50	1.10	0.80
DO	3.60	5.80	1.40	2.20
SSS	2.60	2.80	6.80	1.70
Nitrate	2.40	4.70	1.90	2.50
Depth	1.20	2.20	2.90	21.40
Chl <i>a</i>	1.10	3.80	1.30	17.00
pH	0.30	4.10	3.70	0.00
Velocity	0.10	2.00	1.10	1.80

### 2.2.2 目标生物对环境因子的适宜范围

白姑鱼、日本金线鱼、红星梭子蟹和浅缝骨螺的栖

## 2.2 关键环境变量和适宜范围

### 2.2.1 环境因子的百分比贡献率

由表 3 可知, 白姑鱼环境因子的百分比贡献率排名前 5 位的分别是海底浮游植物密度(49.60%)、颗粒有机碳浓度(11.80%)、海底温度(9.10%)、海底磷酸盐浓度(7.90%)和海底硅酸盐浓度(6.50%), 5 个因子累积贡献率占总贡献率的 84.90%。影响日本金线鱼地理分布的主要环境因子为海底浮游植物密度(52.40%)、海底温度(7.90%)、海底硅酸盐浓度(6.50%)、海底溶解氧浓度(5.80%)及海底硝酸盐浓度(4.70%), 5 个因子累积贡献率占总贡献率的 77.30%。影响红星梭子蟹地理分布的主要环境因子为海底浮游植物密度(48.20%)、海底温度(11.60%)、海底硅酸盐浓度(7.40%)、海底盐度(6.80%)及海底磷酸盐浓度(6.60%), 5 个因子累积贡献率占总贡献率的 80.60%。影响浅缝骨螺地理分布的主要环境因子为海底浮游植物密度(46.30%)、水深(21.40%)、叶绿素 *a* 浓度(17.0%)、海底硅酸盐浓度(3.00%)及海底温度(2.90%), 5 个因子累积贡献率占总贡献率的 90.60%。综上, 可以发现海底浮游植物密度、海底温度及海底硅酸盐浓度是影响这 4 种生物栖息地分布的关键环境因子, 这些因子的贡献率均高于 6.50%(除浅缝骨螺外)。

息地分布与各环境因素密切相关, 表 4 呈现了 12 个环境变量的适宜范围。由表 4 可知, 4 个物种的海底流速、叶

绿素 *a* 浓度、海底溶解氧浓度和酸碱度的适宜范围较为接近。其余变量的适宜范围因物种而异,但都存在一定重

合区间,如白姑鱼和日本金线鱼的海底温度以及红星梭子蟹和浅缝骨螺的初级生产力的适宜范围大致相同。

表 4 各环境因子的适宜范围

Tab. 4 Suitable ranges of various environmental factors

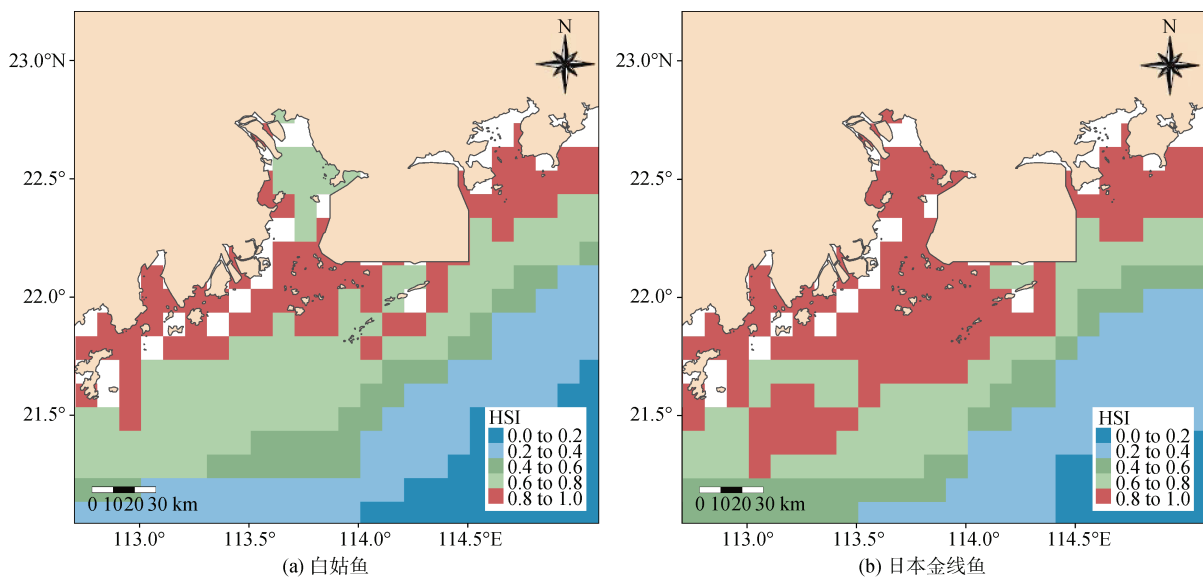
变量	物种			
	白姑鱼	日本金线鱼	红星梭子蟹	浅缝骨螺
Velocity/(m·s <sup>-1</sup> )	0.0~0.6	0.0~0.4	0.0~0.4	0.0~0.4
SBT/°C	8.7~9.5	8.8~9.5	13.2~29.1	18.2~21.2
SSS	27.0~36.0	27.0~42.0	18.0~37.0	28.0~36.0
Chl <i>a</i> /(mg·m <sup>-3</sup> )	0.2~0.9	0.2~0.9	0.2~0.9	0.2~0.9
PP/(mgC·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	500.0~1200.0	900.0~2200.0	100.0~1600.0	100.0~1500.0
pH	7.7~9.0	7.3~9.1	7.7~8.3	7.8~8.9
Phyt/(个·m <sup>-3</sup> )	2.2~9.0	4.5~12.5	3.0~17.5	7.5~18.0
Nitrate/(μmol·L <sup>-1</sup> )	10.0~44.5	5.0~47.5	5.0~43.0	2.0~50.0
Phosphate/(μmol·L <sup>-1</sup> )	0.5~2.5	0.3~2.6	0.3~2.8	0.5~4.2
Silicate/(μmol·L <sup>-1</sup> )	50.0~170.0	90.0~180.0	15.0~165.0	22.0~175.0
DO/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.5~8.2	0.2~6.2	0.3~7.2	0.5~8.2
POC/(mg·m <sup>-3</sup> )	180.0~700.0	20.0~170.0	160.0~350.0	100.0~500.0

从关键环境因子来看,即海底浮游植物密度、海底温度及海底硅酸盐浓度的适宜范围。白姑鱼、日本金线鱼、红星梭子蟹和浅缝骨螺的海底浮游植物密度的适宜范围分别是 2.2~9.0 个·m<sup>-3</sup>、4.5~12.5 个·m<sup>-3</sup>、3.0~17.5 个·m<sup>-3</sup> 和 7.5~18.0 个·m<sup>-3</sup>,适宜区间较宽表明这 4 个物种对海底浮游植物密度适应性较强。海底温度的适宜范围分别为 8.7~9.5 °C、8.8~9.5 °C、13.2~29.1 °C 和 18.2~21.2 °C,表明白姑鱼和日本金线鱼对海底温度的适宜区间较窄,红星梭子蟹和浅缝骨螺对海底温度有较强的适应性。海底硅酸盐浓度的适宜范围分别为 50.0~170.0、90.0~180.0、15.0~165.0

和 22.0~175.0 μmol·L<sup>-1</sup>,它们的适宜区间差异较小。

### 2.3 海洋生物潜在分布区预测

MaxEnt 模型预测的栖息地适宜性指数(HSI)分为 5 个等级,表示栖息地适宜性为高、较高、一般、较低和低。以 HSI≥0.6(较高适宜区)来看,日本金线鱼的适宜面积最大(图 2),其在万山群岛海域内 HSI 均大于 0.8,其次是浅缝骨螺和白姑鱼,红星梭子蟹的适宜面积最小。从目标海洋生物的适宜区来看,HSI≥0.6 被选为理论上适合建设海洋牧场的区域。在海洋牧场拟建设区域,这 4 个物种的 HSI 分布存在大范围重叠区域,预测的重叠区域范围为纬度 21.85°N~22.15°N,经度 113.6°E~114.2°E(图 3)。



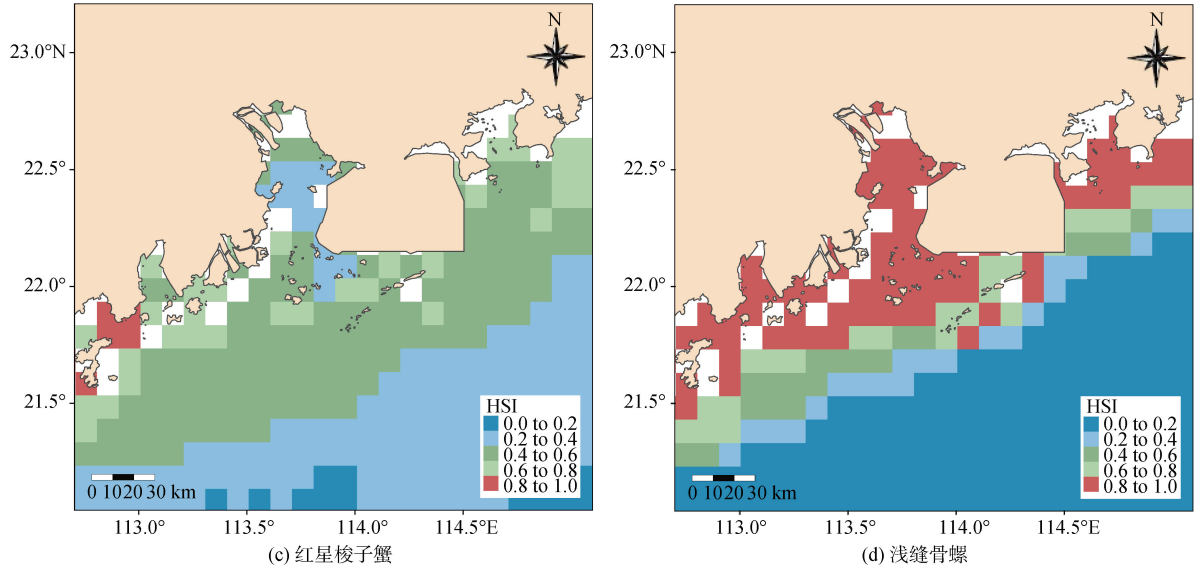


图 2 白姑鱼、日本金线鱼、红星梭子蟹和浅缝骨螺潜在栖息地适宜性指数(HSI)分布图

Fig. 2 Potential habitat suitability index (HSI) distribution maps of *Pennahia argentata*, *Nemipterus japonicus*, *Portunus sanguinolentus*, and *Murex trapa*

注: 基于审图号 GS(2019)4342 号的地图制作, 下文同

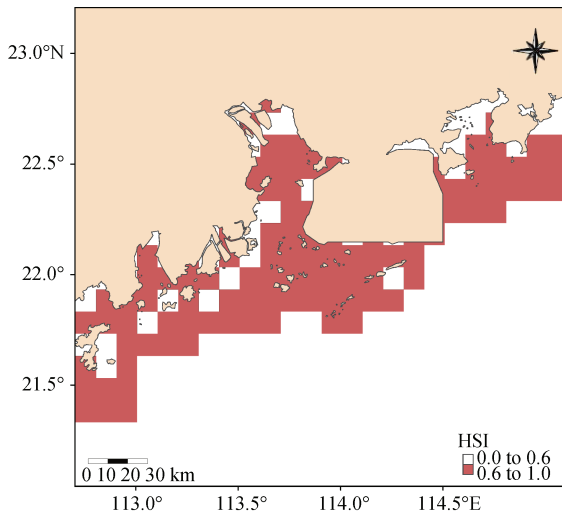


图 3 栖息地适宜性指数(HSI)分布重叠区域图

Fig. 3 Map showing overlapping areas of habitat suitability index (HSI) distribution

### 3 讨论

#### 3.1 目标物种的关键环境因子

通过 MaxEnt 对 4 种海洋生物影响栖息地分布的关键环境因子分析, 我们发现海底浮游植物密度、海底温度及海底硅酸盐浓度是影响这 4 种生物栖息地分布的关键环境因子。温度和营养盐等对于海洋生物群落结构来说都是重要的影响因子, 水温是影响鱼类生长的主要因子能够改变代谢过程的速度, 申

世常等<sup>[14]</sup>的研究结果表明红星梭子蟹生物量与水温因子密切相关和廖永岩等<sup>[32]</sup>认为红星梭子蟹的适宜温度为 15~30 °C 以及叶洁琼等<sup>[16]</sup>认为浅缝骨螺丰度与海底温度呈显著正相关, 这与本研究结果一致。唐广隆等<sup>[33]</sup>的研究发现万山群岛海域渔业生物种类数、丰富度指数、多样性指以及均匀度指数均与海水表层中的硅酸盐浓度呈正相关性, 均与本研究的结构一致, 其原因是该海域多年来浮游植物群落中硅藻门丰度占优势且也与表底层海水硅酸盐浓度显著正相关<sup>[34]</sup>, 硅藻作为浮游植物是水生态系统中的初级生产者, 又是水生动物的直接或间接的饵料对象。又由于浮游植物光合作用效率受营养盐浓度的影响, 营养盐浓度较高时, 浮游植物的生长速度较快, 密度较大, 从而对海洋生物地理分布产生影响<sup>[35]</sup>, 而浮游植物是海洋食物链的基础, 它们通过光合作用产生有机物质, 为其他海洋生物提供能量来源。而大部分渔业资源, 尤其是海洋鱼类是直接或间接地以浮游植物为食的, 浮游植物密度的增加将直接促进浮游动物的繁殖和生长, 进而增加食物链的底层生产力, 从而提高海洋渔业资源的生物量和丰度, 因此本研究中浮游植物密度和营养盐浓度对目标海洋生物的潜在分布区影响较大<sup>[36-39]</sup>。

#### 3.2 MaxEnt 应用于海洋牧场适宜性评估

MaxEnt 模型与广义线性模型、广义加性模型和

随机森林等其它物种分布模型相比,它具有以下优势:可以使用少量的物种分布点和环境变量数据,预测物种在新环境下的潜在分布范围;该模型能够处理非线性和高维度的数据,适用于复杂的生态系统研究;MaxEnt模型具有较高的准确性和预测能力,已广泛应用于物种分布预测、生境适宜性评估、濒危物种及有经济价值物种的适生区预测和预防外来物种入侵等领域<sup>[23, 40]</sup>。MaxEnt模型已经成为物种分布模型领域中应用最广泛的分析方法之一,国内MaxEnt模型多应用于单物种潜在分布区及适宜环境因素研究,鲜有研究应用该模型进行多目标海洋生物的生境适宜性研究。MaxEnt模型能够分析单个海洋生物的分布特征,可以推测它们的生态喜好和适宜海洋牧场建设的环境因素以及这些因素在不同区域的变化情况;还可以通过分析多种海洋生物的分布范围,探讨不同生物之间的共生关系,以及它们对同一环境因素的反应情况。这可以帮助决策者了解多种生物之间的关联性,并提供有利于生态平衡的选址方案。因此本研究尝试通过MaxEnt模型对多目标海洋生物潜在适宜生境进行预测,并通过可视化分布区对其进行重叠选取适宜范围作为建设海洋牧场的理论基础,是基于生物资源的海洋牧场生境适宜性探索,因此选取的海洋生物均为本次生物资源调查各个站点中常见的物种,但在海洋牧场生境适宜性评估时应选择该海域内能够人工繁殖、培育和放流以及能够实现海洋牧场高效产出的海洋经济物种。

## 4 结论

本研究利用渔业调查数据和环境数据库通过MaxEnt模型对万山群岛海域海洋牧场生境适宜性进行了研究,结果表明:(1)海底浮游植物密度、海底温度以及海底硅酸盐浓度是影响白姑鱼、日本金线鱼、红星梭子蟹和浅缝骨螺这4种海洋生物栖息地分布的关键环境因子;(2)基于这4种海洋生物HSI分布区( $HSI \geq 0.6$ )所存在重叠区域来看,海洋牧场拟建设区域应为 $21.85^{\circ}N \sim 22.15^{\circ}N$ 、 $113.6^{\circ}E \sim 114.2^{\circ}E$ 合围区域。海洋牧场适宜性评估应该考虑到生态地理环境和渔业生物资源两个方面的因素,因此在后续的研究中应与生态地理环境相结合,以全面科学评估海洋牧场的适宜性。

### 参考文献:

[1] 林承刚,杨红生,陈鹰,等. 现代化海洋牧场建设与

发展——第230期双清论坛学术综述[J]. 中国科学基金, 2021, 35(1): 143-152.

LIN Chenggang, YANG Hongsheng, CHEN Ying, et al. Construction and development of modern marine ranching—Academic Review of the 230<sup>th</sup> Shuangqing Forum[J]. Science Foundation in China, 2021, 35(1): 143-152.

[2] 柯舒婷,杨璐,鞠培龙,等. 福建省台山列岛周边海域的渔业资源群落结构特征[J]. 应用海洋学学报, 2020, 39(4): 531-541.

KE Shuting, YANG Lu, JU Peilong, et al. Community structure characteristics of fishery stock in the sea of Taisha Islands in Fujian Province[J]. Journal of Applied Oceanography, 2020, 39(4): 531-541.

[3] 谢笑艳,陈丕茂,佟飞,等. 珠海外伶仃岛海域海洋牧场选址探讨[J]. 南方水产科学, 2022, 18(5): 18-29.

XIE Xiaoyan, CHEN Pimao, TONG Fei, et al. Site selection of marine ranching in Wailingding Island sea area of Zhuhai[J]. South China Fisheries Science, 2022, 18(5): 18-29.

[4] 曾旭,章守宇,林军,等. 岛礁海域保护型人工鱼礁选址适宜性评价[J]. 水产学报, 2018, 42(5): 673-683.

ZENG Xu, ZHANG Shouyu, LIN Jun, et al. Site selection suitability assessment for protective artificial reefs in island area[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(5): 673-683.

[5] 单晨枫,刘敏,马成龙,等. 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, 2022, 28(7): 88-93.

SHAN Chenfeng, LIU Min, MA Chenglong, et al. Evaluation of suitability for site selection of artificial reefs for multiplication marine ranching in the sea area of Dachangshan Island based on MCDM[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2022, 28(7): 88-93.

[6] 张朋朋,胡蕾,王小丹,等. 长岛北四岛海洋牧场海域环境适宜性分析[J]. 山东国土资源, 2022, 38(5): 54-62.

ZHANG Pengpeng, HU Lei, WANG Xiaodan, et al. Suitability analysis on marine environment in Beisidao marine ranch area of Changdao Islands[J]. Shandong Land and Resources, 2022, 38(5): 54-62.

[7] 许强,刘舜斌,许敏,等. 海洋牧场建设选址的初步研究——以舟山为例[J]. 渔业现代化, 2011, 38(2): 27-31.

XU Qiang, LIU Shunbin, XU Min, et al. Preliminary study on sites selection of marine ranching—take Zhoushan as an example[J]. Modernization of Fisheries 2011, 38(2): 27-31.

[8] 耿文倩,王庆,战超,等. 海洋牧场选址适宜性评估——以烟台北部海域为例[J]. 海洋环境科学, 2023, 42(2): 302-308, 314.

GENG Wenqian, WANG Qing, ZHAN Chao, et al. Suitabil-

- ity assessment of marine ranching site selection—A case study of Yantai northern sea area[J]. *Marine Environmental Science*, 2023, 42(2): 302-308, 14.
- [9] 袁梦, 汤勇, 徐姗楠, 等. 珠江口南沙海域秋季渔业资源群落结构特征[J]. *南方水产科学*, 2017, 13(2): 18-25. YUAN Meng, TANG Yong, XU Shannan, et al. Community structure of fishery resources from the Nansha waters of Pearl River Estuary in autumn[J]. *South China Fisheries Science*, 2017, 13(2): 18-25.
- [10] 蔡研聪, 徐姗楠, 陈作志, 等. 南海北部近海渔业资源群落结构及其多样性现状[J]. *南方水产科学*, 2018, 14(2): 10-18. CAI Yancong, XU Shannan, CHEN Zuozhi, et al. Current status of community structure and diversity of fishery resources in offshore northern South China Sea[J]. *South China Fisheries Science*, 2018, 14(2): 10-18.
- [11] 马超, 沈长春, 庄之栋, 等. 闽南-台湾浅滩白姑鱼渔业生物学特性研究[J]. *渔业研究*, 2019, 41(1): 34-41. MA Chao, SHEN Changchun, ZHUANG Zhidong, et al. Study on fishery biological characteristics of *Pennahia argentata* in Minnan—Taiwan Bank Fishing Ground[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2019, 41(1): 34-41.
- [12] 徐鹏, 谢木娇, 周卫国, 等. 近30年珠江口海域游泳动物经济物种群落结构变化特征[J]. *应用海洋学学报*, 2021, 40(2): 239-250. XU Peng, XIE Mujiao, ZHOU Weiguo, et al. Community structure characteristics of commercial netkon in the Pearl River Estuary in recent 30 years[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2021, 40(2): 239-250.
- [13] 王锦溪, 罗孔兰, 范瀛方, 等. 北部湾日本金线鱼摄食生态[J]. *渔业科学进展*, 2023, 44(1): 47-57. WANG Jinxi, LUO Konglan, FAN Yingfang, et al. Feeding ecology of *Nemipterus japonicus* in Beibu Gulf[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2023, 44(1): 47-57.
- [14] 申世常, 陈融斌, 黄良敏, 等. 厦门海域蟹类的群落结构特征[J]. *动物学杂志*, 2018, 53(6): 868-877. SHEN Shichang, CHEN Rongbin, HUANG Liangmin, et al. The structure characteristics of crab community in Xiamen coastal waters[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2018, 53(6): 868-877.
- [15] WILLIAMS M, PRIMAVERA J. Choosing tropical portunid species for culture, domestication and stock enhancement in the Indo-Pacific[J]. *Asian Fish Science*, 2001, 14(2): 121-142.
- [16] 叶洁琼, 蔡立哲, 黄睿婧, 等. 北部湾底拖网软体动物的种类组成及其环境影响[J]. *海洋通报*, 2010, 29(6): 617-622. YE Jieqiong, CAI Lizhe, HUANG Ruijing, et al. Species composition of trawling mollusk in Beibu Gulf and its environmental effect[J]. *Marine Science Bulletin*, 2010, 29(6): 617-622.
- [17] KEYL F, WOLFF M. Environmental variability and fisheries: what can models do?[J]. *Reviews in Fish Biology & Fisheries*, 2008, 18(3): 273-299.
- [18] ALABIA I D, SAITOH S I, MUGO R, et al. Seasonal potential fishing ground prediction of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the western and central North Pacific[J]. *Fisheries Oceanography*, 2015, 24(2): 190-203.
- [19] 余为. 西北太平洋柔鱼冬春生群对气候与环境变化的响应机制研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016. YU Wei. Response mechanism of winter-spring cohort of neon flying squid to the climatic and environment variability in the Northwest Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [20] MELNYCHUK M C, KUROTA H, MACE P M, et al. Identifying management actions that promote sustainable fisheries[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(5): 440-449.
- [21] 徐茂真, 张崇良, 薛莹, 等. 山东近海渔业物种多样性与环境因子的关系[J]. *水产学报*, 2022, 46(6): 1008-1017. XU Maozhen, ZHANG Chongliang, XUE Ying, et al. Relationship between species diversity and environmental factors in the fishery community of Shandong coastal waters[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(6): 1008-1017.
- [22] 牛威震, 韩磊, 俞存根, 等. 舟山群岛东侧海域蟹类群落结构及其与环境因子的关系[J]. *海洋学报*, 2022, 44(2): 29-38. NIU Weizhen, HAN Lei, YU Cungen, et al. Crab community structure and its relationship with environmental factors in the eastern sea area of Zhoushan Islands[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(2): 29-38.
- [23] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [24] ELITH J, PHILLIPS S J, HASTIE T, et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists[J]. *Diversity & Distributions*, 2015, 17(1): 43-57.
- [25] 殷晓洁, 周广胜, 隋兴华, 等. 蒙古栎地理分布的主导气候因子及其阈值[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 103-109. YIN Xiaojie, ZHOU Guangsheng, SUI Xinghua, et al. Dominant climatic factors of *Quercus mongolica* geographical distribution and their thresholds[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 103-109.
- [26] ELITH J, GRAHAM C H. Do they? How do they? WHY do they differ? On finding reasons for differing performances of species distribution models[J]. *Ecography*, 2010, 32(1): 66-77.
- [27] THUILLER W, RICHARDSON D M, ROUGET M, et



- al. Interactions between environment, species traits, and human uses describe patterns of plant invasions[J]. *Ecology*, 2006, 87(7): 1755-1769.
- [28] FOURCADE Y, BESNARD A, SECONDI J, et al. Paintings predict the distribution of species, or the challenge of selecting environmental predictors and evaluation statistics[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 201, 27(2): 245-256.
- [29] 李璇, 李焱, 方炎明. 基于优化的 Maxent 模型预测白栎在中国的潜在分布区[J]. *林业科学*, 2018, 54(8): 153-164.
- LI Xuan, LI Yao, FANG Yanming, et al. Prediction of potential suitable distribution areas of *Quercus fabri* in China based on an Optimized Maxent Model[J]. *Scientia Silvae Science*, 2018, 54(8): 153-164.
- [30] 冯志萍, 余为, 陈新军, 等. 基于最大熵模型的智利外海竹筴鱼栖息地研究[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(4): 431-441.
- FENG Zhiping, YU Wei, CHEN Xinjun, et al. Distribution of Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) habitats off Chile based on a maximum entropy model[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(4): 431-441.
- [31] 龚彩霞, 陈新军, 高峰. 基于最大熵模型模拟西北太平洋柔鱼潜在栖息地分布[J]. *中国水产科学*, 2020, 27(3): 336-345.
- GONG Caixia, CHEN Xinjun, GAO Feng. Modeling the potential distribution of the neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific Ocean based on a MaxEnt model[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(3): 336-345.
- [32] 廖永岩, 许振煜, 吴邦臣. 盐度和温度对红星梭子蟹存活和摄饵的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(13): 3396-3405.
- LIAO Yongyan, XU Zhenyu, WU Bangchen. The effect of salinity and temperature on survival and food intake of *Portunus sanguinolentus*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13): 3396-3405.
- [33] 唐广隆, 刘永, 吴鹏, 等. 珠江口万山群岛海域春季渔业资源群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *中国水产科学*, 2022, 29(8): 1198-1209.
- TANG Guanglong, LIU Yong, WU Peng, et al. Community structure of fishery resources and its relationship to environmental factors in the Wanshan Islands sea of the Pearl River estuary in spring[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, 29(8): 1198-1209.
- [34] 戴明, 刘华雪, 吴凤霞, 等. 万山群岛海域网采浮游植物与环境因子的关系[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(4): 540-547, 554.
- DAI Ming, LIU Huaxue, WU Fengxia, et al. Net-phytoplankton community and its relationship with environmental factors in the Wanshan Islands adjacent sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2019, 38(4): 540-547, 554.
- [35] 李子琳, 张海彦, 赵亮, 等. 渤海浮游植物群落结构时空分布及其影响因素[J]. *海洋科学*, 2021, 45(8): 10-20.
- LI Zilin, ZHANG Haiyan, ZHAO Liang, et al. Spatial and temporal distribution and factors influencing the phytoplankton community structure in the Bohai Sea[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(8): 10-20.
- [36] 罗光富, 何剑锋, 张芳, 等. 夏季南极长城湾海流变化特征及其对浮游植物生物量的影响[J]. *海洋学报*, 2016, 38(10): 113-124.
- LUO Guangfu, HE Jianfeng, ZHANG Fang, et al. Effects of current velocity on phytoplankton biomass in Great Wall Bay[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(10): 113-124.
- [37] 施玉珍, 赵辉, 王喜达, 等. 珠江口海域营养盐和叶绿素 *a* 的时空分布特征[J]. *广东海洋大学学报*, 2019, 39(1): 56-65.
- SHI Yuzhen, ZHAO Hui, WANG Xida, et al. Distribution characteristics of nutritive salts and chlorophyll *a* in the Pearl River estuary[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2019, 39(1): 56-65.
- [38] 任辉, 田恬, 杨宇峰, 等. 珠江口南沙河涌浮游植物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2017, 37(22): 7729-7740.
- REN Hui, TIAN Tian, YANG Yufeng, et al. Spatial and temporal distribution of phytoplankton community and its relationship with environment factors in Nansha's Rivers, Pearl River estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7729-7740.
- [39] 陈芑, 陈新军, 雷林. 秘鲁上升流对秘鲁鳀渔场的影响[J]. *水产学报*, 2018, 42(9): 1367-1377.
- CHEN Peng, CHEN Xinjun, LEI Lin. Influence of Peruvian upwelling on the anchoveta (*Engraulis ringens*) fishing ground[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(9): 1367-1377.
- [40] 杨继超, 董民星, 种衍飞, 等. 最大熵模型在海洋生物适生区预测中的应用[J]. *应用海洋学学报*, 2023, 42(4): 698-707.
- YANG Jichao, DONG Minxing, CHONG Yanfe, et al. Application of maximum entropy model in the prediction of marine biological suitable area[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2023, 42(4): 698-707.

# Habitat suitability assessment of Wanshan Marine Ranch based on biological resources

CHU Jiansong<sup>1</sup>, ZHENG Weidong<sup>1</sup>, SUN Liyuan<sup>2</sup>, PENG Daomin<sup>1</sup>, SUO Anning<sup>3</sup>, ZHU Yugui<sup>4</sup>

(1. College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Shandong Fisheries Development and Resources Conservation Center, Yantai 264003, China; 3. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510301, China; 4. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

**Received:** Apr. 21, 2023

**Key words:** marine ranching; Wanshan Archipelago; suitability assessment; MaxEnt model

**Abstract:** The ecological environment in the waters of the Wanshan Archipelago is deteriorating, and there is a continuous decline in fishery resources. Urgent measures are required to establish marine ranching in the Wanshan Archipelago, restore the ecological balance in the waters, and ensure the sustainable utilization of fishery resources. Currently, limited research exists on the suitability assessment of marine ranching based on marine biological resources. This study utilized fishery resource survey data from December 2020, along with the data of 13 environmental factors. The MaxEnt species distribution model was employed to predict potential distribution areas for selected species, namely *Pennahia argentata*, *Nemipterus japonicus*, *Portunus sanguinolentus*, and *Murex trapa*. The study aimed to explore the relationship between the geographical distribution of these marine species and the environmental factors and conduct a habitat suitability assessment for Wanshan Marine Ranch. The results revealed the following: (1) Area under the curve values for each model exceeded 0.9, indicating a well-simulated potential distribution of these species by the constructed model. The MaxEnt model can be applied in the future to predict habitat distribution areas for the four species; (2) Benthic phytoplankton density, seabed temperature, and seafloor silicate concentration emerged as crucial environmental factors influencing the distribution of these four marine species; (3) Based on the overlapping areas of the habitat suitability index distribution for the four marine species using the MaxEnt model, the recommended construction area for marine ranching is suggested to be in the range of 21.85–22.15°N latitude and 113.6–114.2°E longitude. These research findings offer a scientific basis for the planning and construction of Wanshan Marine Ranch.

(本文编辑: 赵卫红)