

珠海外伶仃岛海域海洋牧场选址探讨

谢笑艳^{1,2}, 陈丕茂¹, 佟飞¹, 袁华荣¹, 冯雪¹, 余景¹, 于杰¹, 舒黎明¹

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所/农业农村部海洋牧场重点实验室/国家数字渔业(海洋牧场)创新分中心/中国水产科学研究院海洋牧场技术重点实验室/农业农村部南海渔业资源环境科学观测实验站/广东省海洋休闲渔业工程技术研究中心, 广东广州 510300
2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306

摘要: 海洋牧场选址是海洋牧场建设前需首要考虑的重要环节, 适宜的选址是确保海洋牧场建设成功的前提。文章从海岸线稳定性、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个方面选取了34个指标作为海洋牧场适宜性评价的因素, 建立海洋牧场选址指标体系。在此基础上, 根据珠海外伶仃岛海域实际情况, 选取岛屿海岸线长度和面积变化强度、海洋功能区划、海洋生态红线、养殖水域滩涂规划、港口、锚地、通航密集区、海底管线等8个指标, 采用地理信息系统空间分析方法, 对珠海外伶仃岛海域海洋牧场选址进行适宜性评价。结果表明, 研究区域内无最适宜和较适宜进行海洋牧场建设的区域, 一般适宜和不适宜的区域所占面积分别为33.09和45.59 km², 其中适宜海洋牧场建设区域与珠海市目前已建人工鱼礁和规划海洋牧场区域范围相近。

关键词: 地理信息; 海洋牧场选址; 外伶仃岛

中图分类号: S 937.3

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Site selection of marine ranching in Wailingding Island sea area of Zhuhai

XIE Xiaoyan^{1,2}, CHEN Pimao¹, TONG Fei¹, YUAN Huarong¹, FENG Xue¹, YU Jing¹, YU Jie¹, SHU Liming¹

1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Key Laboratory of Marine Ranching, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/National Digital Fisheries (Marine Ranching) Innovation Sub-Center/Key Laboratory of Marine Ranching Technology, Chinese Academy of Fishery Sciences/Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environments, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Engineering Technology Research Center of Marine Recreational Fishery, Guangzhou 510300, China
2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Site selection of marine ranching plays a key role in marine ranching construction. Appropriate site is the precondition of a successful marine ranching construction. In this study, we selected 34 indicators as the factors for marine ranching suitability evaluation (Coastline stability, marine functional zoning, marine ecological red lines, aquaculture water tidal flat planning, marine engineering and facilities), and established an index system for marine ranching site selection. On this basis, according to the actual situation of Wailingding Island of Zhuhai, we selected eight indexes including length and area change intensity of island coastline, marine functional zoning, marine ecological red line, beach planning of aquaculture waters, ports, anchorages, navigable areas and submarine pipelines, to evaluate the suitability of marine ranching site selection in that sea area by using the spatial analysis method of GIS. The results show that there was no most suitable and more suitable area for marine ranching construction, and the areas of generally suitable and unsuitable areas for marine pasture construction were 33.09 and 45.59 km², re-

收稿日期: 2021-08-23; **修回日期:** 2021-12-26

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2020B1111030002); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2020TD06); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2021SD02)

作者简介: 谢笑艳(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋牧场选址。E-mail: 15225592935@163.com

通信作者: 陈丕茂(1969—), 男, 研究员, 从事海洋牧场研究。E-mail: chenpm@scsfri.ac.cn

spectively. The suitable area for marine ranching construction was similar to the existing artificial reefs and planned marine ranching areas in Zhuhai.

Keywords: Geographic information; Site selection of marine ranching; Wailingding Island

发展海洋牧场是中国修复近海渔业资源、改良渔业水域环境和促进近海渔业可持续发展的重要政策^[1]。万山群岛海域地处珠江口东南部, 外伶仃岛海域位于万山群岛东北部。历史上万山群岛的万山渔场是我国著名渔场之一。然而, 多年来受过度捕捞和环境污染等因素影响, 万山群岛海域渔业资源衰退、生态环境退化严重^[2], 渔民生产、生活受到严重影响, 建设万山群岛海洋牧场、修复海洋资源环境、促进渔业转型升级, 已成当务之急。

海洋牧场选址是对拟建海洋牧场海域的地理条件、生物环境条件、物理化学条件及其他因素进行综合调查与分析, 确定海洋牧场适宜建设区域的过程。选址作为海洋牧场建设的首要环节, 其适宜性关系到建设效果甚至成败。目前, 国内外关于海洋牧场研究多集中于生境建设、生物增殖和利用等方面^[3-4], 而海洋牧场选址适宜性研究尚处于探索阶段。已有研究对阿拉伯湾海域结合海区实际的水深、流速和盐度等海况要素进行人工鱼礁选址^[5]; 许强^[6]选取海域功能、可接近性、流速、水质、水深、坡度、底质类型、初级生产力、渔业资源等 9 个典型指标使用层次分析法进行选址评价; 曾旭等^[7]基于多准则决策方法, 结合专家系统、层次分析法、GIS 空间分析, 对浙江舟山群岛东北部马鞍列岛海域海洋牧场进行选址适宜性评价; 李英雪^[8]选取环境化学指标 (叶绿素浓度、化学需氧量、无机氮和活性磷酸盐)、环境生物学指标 (浮游动植物生物量、底栖动物生物量和鱼类资源密度) 和物理环境指标 (水深、透明度、悬浮物和沉积物粒径) 等三大指标使用层次分析法进行人工鱼礁选址生态适宜性评价。地理条件是海洋牧场选址的决定性因素之一, 但基于海洋地理条件用海适宜性进行海洋牧场选址尤其是基于海岸线稳定性、海洋生态红线、养殖水域滩涂规划等指标进行岛礁海洋牧场选址适宜性评价的研究尚未见报道。

本研究从海岸线稳定性、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 (表 1—表 5) 作为海洋牧场选址适宜性评价的因素, 建立海洋牧场选址指标体系, 并采用地理信息系统空间分析方法对珠海

外伶仃岛海域海洋牧场选址进行适宜性评价, 以期 为海洋牧场选址尤其是岛礁海洋牧场选址提供参考。

表1 基于海岸线变迁强度的海洋牧场选址评价指标分析
Table 1 Evaluation index of marine ranching location based on coastline change intensity

评价阈值范围 Evaluation threshold range/%	评价结果 Evaluation result	海洋牧场选址 适宜程度赋值 Evaluation of suitability of marine ranching site selection
$-0.5 \leq LCI_{ij} \leq 0.5$	最适宜	3
$-1 \leq LCI_{ij} < -0.5$ 或 $0.5 \leq LCI_{ij} < 1$	较适宜	2
$LCI_{ij} < -1$ 或 $LCI_{ij} > 1$	一般适宜	1

注: LCI_{ij} 表示 LI_{ij} 或 AI_{ij} , 表 8 同此。
Note: LCI_{ij} indicates LI_{ij} or AI_{ij} . The same case in Table 8.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

外伶仃岛是珠海市担杆镇政府所辖 38 个海岛之一, 也是镇政府所在地, 西距珠海市区 27 nmile, 北距深圳 29 nmile, 香港长洲 6 nmile。该岛面积 4.23 km², 地势东西高, 北部和中部低, 东部沿岸较陡, 岛中央主峰伶仃峰高 311.8 m。岛上水、电、交通、通讯等基础设施齐备, 珠海市区有定期客货船只来往, 珠海九洲机场开通直升机直航外伶仃岛旅游项目。是珠海十大美丽海岛之一、国家 AAAA 级海岛风景区, 旅游资源丰富。

1.2 指标选取与数据来源

1.2.1 海洋牧场选址的主要影响因素和等级划分

根据建设目的, 海洋牧场分为养护型、增殖型和休闲型 3 类, 这 3 类海洋牧场均为综合型海洋牧场, 具有不同程度的资源养护、生物增殖和休闲渔业功能, 均可相互转化; 资源养护功能占主导地位的为养护型海洋牧场, 生物增殖功能占主导地位的为增殖型海洋牧场, 休闲渔业功能占主导地位的为休闲型海洋牧场, 故本文不再根据建设海洋牧场的目的来讨论分区适宜性。基于地理条件的海洋牧场选址涉及海岸线稳定性、海洋功能区划、海洋生态红线、养殖水域滩涂规划和交通、港口设施等多种因素。因此, 在选址时既要确保评价指标全面, 又

表2 基于海洋基本功能分区及管理要求的海洋牧场选址评价指标分析
Table 2 Evaluation index of marine ranching site selection based on marine basic function zoning and management requirements

指标 Index	二级功能区划分 Secondary functional zoning	主要管理要求 Main management requirements	适宜程度 Suitability	适宜程度赋值 Evaluation of suitability
农渔业区 Agriculture and fishery area	农业围垦区	围垦设施建设	不适宜	0
	养殖区	底播养殖	最适宜	3
		筏式养殖	一般适宜	1
		网箱养殖	一般适宜	1
		增殖区	海水增殖	最适宜
	捕捞区	海水捕捞生产	最适宜	3
	水产种质资源保护区	与其他类型保护区重叠	不适宜	0
		剩余区域	最适宜	3
	渔业基础设施区	渔港和育苗场等渔业基础设施	不适宜	0
港口航运区 Port shipping area	港口区	开发利用港口航道资源	不适宜	0
	航道区			0
	锚地区			0
工业与城镇用海区 Industrial and urban sea area	工业用海区	临海工业、工业园区建设	不适宜	0
	城镇用海区	城镇建设	不适宜	0
矿产与能源区 Mineral and energy area	油气区	油气和固体矿产等勘探、开采作业，盐田、可 再生能源开发利用	不适宜	0
	固体矿区			0
	盐田区			0
	可再生能源区			0
旅游休闲娱乐区 Tourism leisure and entertainment area	风景旅游区	旅游景区开发和海上文体娱乐活动场所建设	最适宜	3
	文体休闲娱乐区			3
海洋保护区 Marine conservation area	海洋自然保护区	核心区：禁止任何单位和个人进入	不适宜	0
		缓冲区：只准进入从事科学研究观测活动	不适宜	0
		实验区：可以进入从事科学试验、教学实习、 参观考察、旅游以及驯化、繁殖珍稀、濒危野 动植物等活动	一般适宜(开发旅 游、开展驯化繁殖等 活动)	1
		重点保护区：禁止实施各种与保护无关的工程 建设活动	一般适宜(开展人工 鱼礁建设、增殖放流 等生态修复活动)	1
	海洋特别保护区	适度利用区：鼓励实施与保护区保护目标相一 致的生态型资源利用活动，发展生态旅游、生 态养殖等海洋生态产业	最适宜	3
		生态与资源恢复区：根据科学研究结果，可以 采取适当的人工生态整治与修复措施，恢复海 洋生态、资源与关键生境	一般适宜(开展人工 鱼礁建设、增殖放流 等生态修复活动)	1
		预留区：严格控制人为干扰，禁止实施改变区 内自然生态条件的生产活动和任何形式的工程 建设活动	不适宜	0
特殊利用区 Special utilization area	军事区	限制在军事区从事海洋开发利用活动	不适宜	0
	其他特殊利用区	严禁在海底管线、跨海路桥区内建设永久性建 筑物	不适宜	0
保留区 Reserved area	保留区	通过科学规划和严格论证，可开发利用	最适宜	3
		未通过科学规划和严格论证，不可开发利用	不适宜	0

表3 基于红线区分类管控要求的海洋牧场选址适宜性分析

Table 3 Suitability analysis of marine ranching site selection based on classification and management requirements of red line area

指标 Index	主要管理要求 Main management requirement	适宜性 Suitability	适宜程度赋值 Evaluation of suitability
海洋保护区生态红线区 Ecological red line area of marine reserve	海洋自然保护区 核心区和缓冲区: 禁止开展任何形式的开发建设活动, 无特殊原因, 禁止任何单位和个人进入 禁止类红线区	不适宜	0
	海洋自然保护区 实验区: 禁止进行捕捞、挖沙等活动, 严格控制河流入海污染物排放, 不得新增入海陆源工业直排口, 控制养殖规模 限制类红线区	一般适宜	1
	海洋特别保护区 重点保护区: 禁止实施各种与保护无关的工程建设活动 禁止类红线区	不适宜	0
	预留区: 禁止实施改变区内自然生态条件的生产活动和任何形式的工程建设活动	不适宜	0
	海洋特别保护区 生态与资源恢复区: 可采取适当的人工生态整治与修复措施, 恢复海洋生态、资源与关键生境 限制类红线区	一般适宜	1
	适度利用区: 确保海洋生态系统安全的前提下, 允许适度利用海洋资源, 鼓励实施与保护区保护目标相一致的生态型资源利用活动, 发展生态旅游、生态养殖等海洋生态产业	一般适宜	1
重要河口生态系统生态红线区 Ecological red line area of important estuary ecosystem	鼓励生态化养殖, 加强对受损重要河口生态系统的综合整治与生态修复	一般适宜	1
重要海滨湿地生态红线区 Important coastal wetland ecological red line area	维持海域自然属性, 保持自然岸线形态、长度, 保持潮滩地形地貌稳定	一般适宜	1
重要渔业海域生态红线区 Ecological red line area in important fishery sea area	开展增殖放流活动, 保护和恢复水产资源	一般适宜	1
特别保护海岛生态红线区 Special protection of island ecological red line area	禁止类红线区: 禁止开展任何形式的开发建设活动	不适宜	0
	限制类红线区: 加强对受损海岛生态系统的整治与修复, 维持海域自然属性, 保护渔业资源产卵场、育幼场、索饵场和洄游通道	一般适宜	1
自然景观与历史文化遗迹生态红线区 Ecological red line area of natural landscape and historical and cultural relics	严格控制岸线附近的景区建设工程, 限制近海养殖活动	不适宜	0
珍稀濒危物种集中分布区生态红线区 Ecological red line area of rare and endangered species concentrated distribution area	生产设施与珍稀濒危物种集中分布区之间应保留一定距离	不适宜	0
重要滨海旅游区生态红线区 Important coastal tourist area ecological red line area	禁止从事可能改变和影响滨海旅游的开发建设活动	一般适宜	1
重要砂质岸线及邻近海域生态红线区 Important sandy shoreline and ecological red line area of adjacent sea area	砂质海岸向海一侧3.5 nmile内禁止采挖海砂、围填海、倾废等开发活动, 加强对受损砂质岸线的修复	一般适宜	1
沙源保护海域生态红线区 Ecological red line area of shayuan protected sea area	砂质海岸向海一侧3.5 nmile内禁止采挖海砂、围填海、倾废等开发活动, 实施沙滩养护等岸线整治修复工程	一般适宜	1
红树林生态红线区 Mangrove ecological red line area	除科学试验、教学实习、参观考察、旅游以及驯化、繁殖珍稀濒危野生动植物等活动外, 限制开展其他活动	不适宜	0
珊瑚礁生态红线区 Coral reef ecological red line area	禁止可能破坏珊瑚礁的开发活动	不适宜	0
海草床生态红线区 Seaweed bed ecological red line area	禁止可能毁坏海草床的开发建设活动	不适宜	0

表4 基于水域滩涂划分管理要求的海洋牧场选址评价指标分析

Table 4 Evaluation index of marine ranching site selection based on management requirements of tidal flat division

指标 Index	二级功能区划分 Secondary functional zoning	主要管理要求 Main management requirements	适宜性 Suitability	适宜程度赋值 Evaluation of suitability
养殖区 Culture area	底播养殖区	坚硬海底底质类型，投放海域环境条件适宜	最适宜	3
	网箱养殖区		一般适宜	1
	筏式养殖区	浅海与潮间带设置浮动筏架，筏上挂养养殖对象	一般适宜	1
限养区 Limited maintenance area	海洋自然保护区限养区	国家和省已划定的自然保护区实验区和外围保护地带，即一般控制区	一般适宜	1
	海洋特别保护区限养区	渔业开发活动限定为生态养殖	一般适宜	1
	海洋生态红线限养区	禁止进行捕捞、挖沙等活动，严格控制河流入海污染物排放，不得新增入海陆源工业直排口，控制养殖规模	一般适宜	1
	无居民海岛周边海域限养区	进行水产养殖应采取污染防治措施，污染物排放不得超过国家和地方规定的污染物排放标准	较适宜	2
禁养区 Forbidden area	重点近岸海域限养区	保护海域生态环境，促进近岸海洋综合整治	较适宜	2
	海洋自然保护区禁养区	禁止任何单位和个人进入	不适宜	0
	海洋湿地禁养区	保护区之外的其他海洋湿地保护范围	不适宜	0
	海洋特别保护区禁养区	用于珍稀、濒危海洋生物物种，自然遗迹和典型海洋生态系统保护	不适宜	0
	海洋生态红线禁养区	禁止实施改变区内自然生态条件的生产活动和任何形式的工程建设活动	不适宜	0
	建设用海空间禁养区	包括港口航运区、工业与城镇用海区、航道和锚地等	不适宜	0
	近岸海域禁养区	保护近岸海域生态环境，禁止在近岸海域进行养殖活动	不适宜	0
	无居民海岛周围海域禁养区	无居民海岛周围200 m水域可适当开展增殖	较适宜	2

要根据具体实例分析研究区域影响海洋牧场建设的主要因素，使指标体系全面、准确、简洁、有效。目前，海洋牧场选址适宜性尚无明确统一的评价标准，本研究结合已有成果^[9-12]，建立基于地理条件的海洋牧场选址适宜性评价指标体系，开展海洋牧场选址适宜性评价，并依据各项指标对海洋牧场布置的适宜性程度和限制性强度进行等级划分，并赋予相应的数值，用于分析各评估指标在海洋牧场选址适宜性上的相对空间差异，赋值越高代表越适宜海洋牧场建设，最适宜的赋值 3，较适宜的赋值 2，一般适宜的赋值 1，不适宜的赋值 0。

1) 基于海岸线稳定性的指标评价和等级划分：海岸线是人类开发利用的重要区域，临近海岸和岛礁的海洋牧场选址要优先考虑海岸线是否稳定，不稳定的海岸线会对海洋牧场长远发展不利。本研究采用某时段内海岸线长度和面积的平均变化百分比来表示海岸线稳定性，岛屿海岸线长度和面积变化强度计算公式如下^[13-14]：

$$LI_{ij} = \frac{L_j - L_i}{L_i(j - i)} \times 100\%$$

(1)

$$AI_{ij} = \frac{A_j - A_i}{A_i(j - i)} \times 100\%$$

(2)

式中：LI_{ij} 表示第 i 至第 j 年岛屿海岸线长度的变化强度；L_j 和 L_i 分别表示对应年份岛屿海岸线的长度；AI_{ij} 表示第 i 至第 j 年岛屿海岸线所围面积的变化强度；A_j 和 A_i 分别表示对应年份岛屿海岸线所围面积。岛屿海岸线长度变化强度有正负之分，正值表示岸线向海推进的距离，负值则表示岸线向陆后退的距离。长度变化强度的绝对值越大，海岸线时空变化越明显。岛屿海岸线所围面积变化强度结果值也有正负之分，正值表示岛屿面积增加，负值表示岛屿面积减小。面积变化强度的绝对值越大，岛屿面积变化越明显。

参考张心玉^[14]的研究结果，将海岸线变化强度评价结果划分为海洋牧场选址最适宜、较适宜和一般适宜 3 个等级，分别赋值为 3、2 和 1 (表 1)。

表5 基于海洋工程和设施的海洋牧场选址评价指标分析
Table 5 Evaluation index of marine ranching site selection based on marine engineering and facilities

指标 Index	主要管理要求 Main management requirements	适宜性 Suitability	适宜程度赋值 Evaluation of suitability
水利 Water conservancy	需设置缓冲区安全范围	不适宜	0
海上开采 Offshore mining	需设置缓冲区安全范围	不适宜	0
航道 Channel	需设置缓冲区安全范围	不适宜	0
港区 Port Area	泊船进出停泊装卸货物或者旅客集散	不适宜	0
锚地 Anchorage	船舶在水上抛锚以便安全停泊、避风防台、等待检验引航、从事水上过驳、编解船队及其他作业	不适宜	0
通航密集区 Navigable dense area	单位时间内通过某一航道断面的船舶或船队数量多	不适宜	0
倾废区 Dumping area	向海洋倾泻废物	不适宜	0
海底管线 Submerged pipeline	需设置缓冲区安全范围	不适宜	0
其他海洋工程或设施 Other offshore projects or facilities	海洋工程用海	不适宜	0

2) 基于海洋基本功能分区的指标评价和等级划分: 根据《广东省海洋功能区划》^[15] 海洋基本功能分区及管理要求 (表 2), 农渔业区养殖区中的底播养殖区、农渔业区中的增殖区、捕捞区、水产种质资源保护区中未与其他保护区重叠区、旅游休闲娱乐区、海洋特别保护区的适度利用区和保留区中通过科学规划和严格论证的海域最适宜选址建设海洋牧场, 赋值为 3; 其次, 农渔业区养殖区中的筏式养殖区与网箱养殖区、海洋自然保护区中的实验区、海洋特别保护区中的重点保护区和生态与资源恢复区均为一般适宜选址建设海洋牧场, 赋值为 1; 其他类型的海洋基本功能分区均不适宜选址建设海洋牧场, 赋值为 0。

3) 基于红线区分类的指标评价和等级划分: 海洋生态红线本质上是一种海洋区划管理制度^[16], 海洋牧场选址位置应考虑是否符合其管理要求。根据《广东省海洋生态红线》^[17] 红线区分类管控要求 (表 3), 海洋自然保护区限制类红线区中的实验区、海洋特别保护区限制类红线区中的生态与资源恢复区及适度利用区、重要河口生态系统生态红线区、重要海滨湿地生态红线区、重要渔业海域生态红线区、特别保护海岛生态红线区中的限制类红线区、重要滨海旅游区生态红线区、重要砂质岸线及邻近海域生态红线区、沙源保护海域生态红线区均为一般适宜选址建设海洋牧场, 赋值为 1; 其他类型均不适宜选址建设海洋牧场, 赋值为 0。

4) 基于水域滩涂划分的指标评价和等级划

分: 养殖水域滩涂规划是渔业管理的基本制度, 通过合理布局水产养殖生产, 有利于保护水域生态环境, 对海洋牧场稳定发展是必要的。综合各地养殖水域滩涂规划管理要求 (表 4), 最适宜海洋牧场选址建设的海域是养殖区中的底播养殖区, 赋值为 3; 较适宜区域包含无居民海岛周边海域限养区、重点近岸海域限养区和无居民海岛周围海域禁养区, 赋值为 2; 一般适宜区域包含养殖区中的筏式养殖区与网箱养殖区、海洋自然保护区限养区、海洋特别保护区限养区和海洋生态红线区限养区, 赋值为 1; 其他类型均不适宜选址建设海洋牧场, 赋值为 0。

5) 基于海洋工程和设施的指标评价和等级划分: 根据《国家级海洋牧场示范区管理工作规范》^[18] 对海洋牧场选址要求 (表 5), 需符合国家和地方海域管理、渔业发展规划和海洋牧场建设规划, 以及生态保护红线和其他管控要求, 与水利、海上开采、航道、港区、锚地、通航密集区、倾废区、海底管线及其他海洋工程设施和国防用海等不相冲突, 即与其他海洋工程和设施用海冲突的海域均不适宜建设海洋牧场, 均赋值为 0。

1.2.2 数据收集与处理

研究区域数据主要包括: 1978、1986、1990、1995、2000、2005、2010、2015、2020 年等 9 个时相的外伶仃岛周边海域遥感影像数据, 遥感影像均来自 Landsat 系列, 轨道号为 122/45, 选择成像好、云量相对较少且对研究区域无影响的影像。数据来源于美国地质勘探局 (United States Geological

Survey, USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>)。海域使用类型数据见表 6。2019 年 4 月—2021 年 3 月间每月月中当天 (每月第 15 天) 的船舶航行数据, 源于船讯网 (<http://www.shipxy.com/>)。用 ArcGIS 10.7 软件绘制地图, 数据来源于全国地理信息资源目录服务系统 (<https://www.webmap.cn/>, 1 : 25 万全国基础地理数据库, 2019 公众版)。

表6 研究区域海域使用类型
Table 6 Type of sea area usage in survey area

使用类型 Sea area usage of survey area	数据来源 Data source
养殖水域滩涂 Tidal flat in aquaculture waters	《珠海市养殖水域滩涂规划》 ^[19]
海洋功能区划 Marine functional zoning	《广东省海洋功能区划》 ^[15]
海洋生态红线 Ocean ecological red line	《广东省海洋生态红线》 ^[17]
水利 Water conservancy	无此海洋工程
海上开采 Offshore mining	无此海洋工程
航道 Channel	无此海洋工程
港区 Port Area	《中国航路指南 (南海海区)》 ^[20]
锚地 Anchorage	《中国航路指南 (南海海区)》 ^[20]
通航密集区 Navigable dense area	AIS数据
倾废区 Dumping area	无此海洋工程
海底管线 Submerged pipeline	《中国航路指南 (南海海区)》 ^[20]
其他-禁止抛锚禁止捕鱼 Others-no anchoring, no fishing	《中国航路指南 (南海海区)》 ^[20]

船舶密度分布实质上是指某一水域中船舶的空间分布, 本研究通过对船舶航行数据分析获取研究区域的通航密集区。首先对船舶航行数据进行预处理, 包括轨迹数据组织、删除错误记录、删除异常位置, 然后采用 ArcGIS 10.7 软件数据处理平台, 利用空间分析模块下 Line Density 命令生成航迹密度图。

2 结果

2.1 研究区域确定

海洋生态空间是整体的、系统的和复合的, 海洋资源是流动的、立体的, 海洋动态变化性强, 区域差异性不显著^[21], 由于以上原因目前尚未见有

海岛与海岛之间海域区分的研究报道。本研究对外伶仃岛海洋牧场选址研究区域的确定方法, 是将其与邻近海岛的最近点进行连线, 根据其周围岛礁分布的实际情况, 选取外伶仃岛与正北、西北、东北、西南、东南 5 个方向的岛礁, 取这些连线的中点, 将这些中点连接成封闭区域, 即本研究的研究区域。根据上述方法, 计算外伶仃岛到周围岛礁的最短距离 (表 7), 确定外伶仃岛拟建海洋牧场区域的面积为 78.68 km² (图 1)。

表7 外伶仃岛到周围岛礁的最短距离
Table 7 Shortest distance from Wailingding Island to surrounding island reefs

中点名称 Midpoint name	岛屿名称 Island name	最短距离 Minimum distance/m
A	石鼓洲	9 696.2
B	黑洲	6 229.3
C	三门洲	4 799.6
D	直湾岛	14 179.3
E	南丫岛	11 000.6
F	长洲	9 415.5

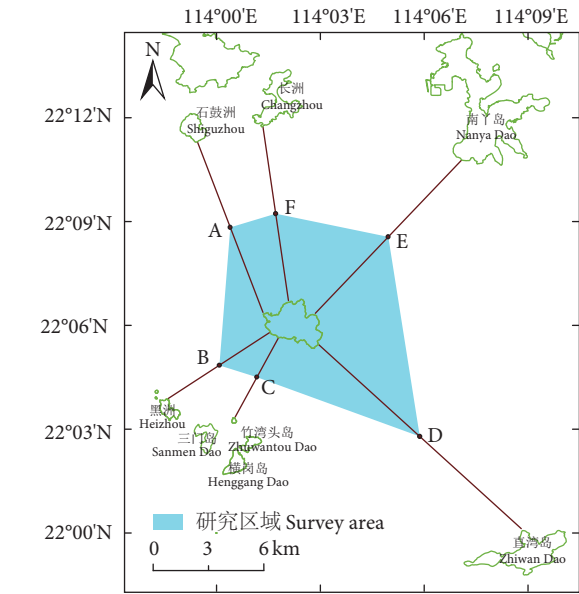


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location map of survey area

2.2 外伶仃岛海岸线变迁分析

本研究统计了 1978—2020 年岛屿海岸线长度和所围面积变化 (图 2)。外伶仃岛海岸线总长度从 1978 年的 11.08 km 变为 2020 年的 12.04 km, 增加了约 0.96 km, 年均增加 0.023 km, 变化强度为 0.206%, 其中 2000—2005 年和 2010—2015 年增

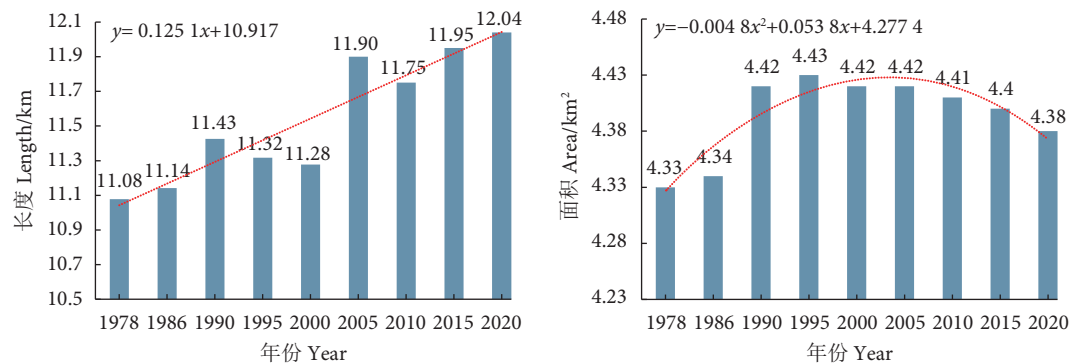


图2 1978—2020年外伶仃岛海岸线长度和面积变化

Fig. 2 Changes of coastal line length and area in Wailingding Island from 1978 to 2020

加较多，2005—2010 年则出现较大幅度减少。外伶仃岛海岸线所围成的陆地面积从 1978 年的 4.33 km² 增加为 2020 年的 4.38 km²，增加了约 0.05 km²，年均增加 0.001 km²，变化强度为 0.027%，其中 1986—1990 年增加较多，1995 年起开始出现缩小趋势。

2.3 指标评价结果

2.3.1 海岸线稳定性分析

根据 1978—2020 年海岸线变化分析，外伶仃岛 42 年间长度变化强度为 0.206%，面积变化强度为 0.027%，根据本研究对海岸线适宜性的评价方法，外伶仃岛长度和面积变化强度均小于 0.5%，

该海域适宜开展海洋牧场建设。

2.3.2 外伶仃岛海域海洋牧场选址适宜性

按照本研究建立的海洋牧场选址适宜性评价指标，结合外伶仃岛实际情况对其进行海洋牧场选址适宜评价(表 8)。按照广东省海洋功能区划和海洋生态红线的要求，研究区域分别位于万山群岛旅游休闲娱乐区、万山群岛重要渔业海域限制类红线区、部分位于万山群岛重要滨海旅游区限制类红线区(图 3)，适宜进行海洋牧场建设。根据珠海市养殖水域滩涂规划的要求，研究区部分海域位于建设用海空间禁养区和海洋生态红线限养区(图 4-a)，剩余海域适宜进行海洋牧场建设。根据《国家级海

表8 外伶仃岛海域海洋牧场选址适宜性评价结果

Table 8 Suitability of marine ranching site selection in Wailingding Island

项目 Item	分类 Classification		赋值 Evaluation	面积 Area/km ²
海岸线稳定性 Coastline stability	-0.5≤LCI≤0.5		3	—
海洋功能区划 Marine functional zoning	万山群岛旅游休闲娱乐区		3	12.31
	万山群岛保留区		3	78.68
海洋生态红线 Ocean ecological red line	万山群岛重要滨海旅游区生态红线区		1	12.31
	万山群岛重要渔业海域生态红线区		1	78.68
养殖水域滩涂规划 Tidal flat planning in aquaculture waters	建设用海空间禁养区		0	29.34
	海洋生态红线限养区		2	12.31
	养殖区		3	37.68
海洋工程和设施 Marine engineering and facilities	港口及其缓冲区		0	1.47
	锚地		0	3.81
	通航密集区	中等及以上密集	0	34.02
		一般密集	2	22.31
		不密集	3	21.35
	海底管线及其缓冲区		0	27

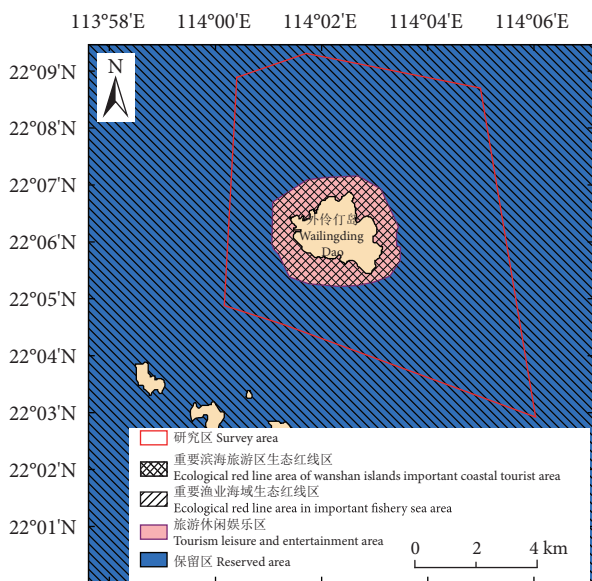


图3 外伶仃岛海域海洋功能区划和生态红线区控制图

Fig. 3 Marine functional zoning and ecological red line control chart in Wailingding Island sea area

《海洋牧场示范区管理工作规范》要求,研究区内包含的海洋工程设施有港口(图4-b)、锚地(图4-c)、通航密集区(图4-d)和海底管线(图4-e)。港口及海底管线均需要注意与其留有足够的安全距离,避免发生安全隐患,对未来海洋牧场建设产生不利影响。

2.3.3 综合评价结果

本研究中选择适宜性评价结果优先级由高到低依次为不适宜>一般适宜>较适宜>适宜,即研究区域内某一评价指标为不适宜,则该区域最终结果即为不适宜选址建设海洋牧场,故该区域不进行指标相加运算;当所有评价指标均满足适宜条件(一般适宜、较适宜、最适宜)时,将指标对应评分相加得出最终评价结果。研究表明,综合海岸线稳定性、海洋功能区划、海洋生态红线、养殖水域滩涂规划、海洋工程和设施等因素,最终计算得出外伶仃岛海域一般适宜选址建设海洋牧场区域的分数为15~19,所占面积33.09 km²,不适宜的区域面积为45.59 km²(图5)。

3 讨论

3.1 指标选取准则

海洋牧场选址受地理条件、生物环境条件、物理化学条件等诸多因素影响^[11,22],其中地理条件是海洋牧场选址的决定性因素之一,对应的指标包括海岸线稳定性、海洋功能区划符合性、海洋生态红线区符合性、养殖水域滩涂符合性和海洋工程和设

施符合性。海岸线是发展海洋经济的前沿阵地,具有重要的生态功能和资源价值。岸线侵蚀和人类主导下围填海造成的人工岸线扩张是海岸线变动的主要因素,岸线侵蚀过程带来的影响有海岸带生物多样性资源损失和滨海生态系统服务功能损坏等^[14,23];人工岸线扩张带来的影响有打破原位及附近海区原有的冲刷与淤积平衡状态、干扰或逆转海岸线的自然演变趋势、海洋环境恶化和海水富营养化问题加重等^[14,24-26],临近海岸和岛礁的海洋牧场选址要考虑海岸线是否稳定,海岸线变动造成的影响不利于海洋牧场建设及其长远发展。海洋功能区划本质上是一种在开发中实施保护的管理方法,而海洋生态红线区划是以生态系统为基础的管理手段^[27],海洋生态红线是海洋功能区划定的参照基础,海洋功能区划是实施海洋牧场选址的重要准则,是海域综合开发利用与管理的集中体现,因此在进行海洋牧场选址评价时要考虑到与海洋功能区划、海洋生态红线的兼容性与排他性。海洋生态红线区符合性、养殖水域滩涂符合性、海洋工程和设施符合性同样是实施海洋牧场选址的重要准则,因此在实际开展海洋牧场选址时,有必要将其考虑在内。李文涛和张秀梅^[28]、许强和张守宇^[11]进行人工鱼礁或海洋牧场选址研究时均提到将海洋功能区划符合性纳入选址指标,并未考虑海岸线稳定性、海洋生态红线区符合性、养殖水域滩涂符合性、海洋工程和设施符合性。本研究在进行海洋牧场选址评价时将上述指标均纳入评价体系,且外伶仃岛海洋牧场选址评价结果与其已建人工鱼礁区和已规划海洋牧场区范围较相近,未来海洋牧场建设可与已有鱼礁形成大规模稳定的生态人工鱼礁群,有效修复和构建水产生物的生活和栖息场所,优化海域生态环境。

3.2 海洋牧场选址的对比分析

本研究使用创新性方法建立珠海外伶仃岛海洋牧场选址研究区域,因未查到其他文献中有相关方法的研究报道,故未进行对比分析。国内外针对海洋牧场方面的选址研究多倾向于开展人工鱼礁选址,一致认为鱼礁选址过程是整个海洋牧场建设过程中最重要的环节^[6],目前使用最普遍的研究方法是层次分析法(Antalytic Hierarchy Process, AHP)。如王飞等^[29]、Mousavi等^[30]、许妍等^[9]基于AHP模型,结合物理环境、生物资源、化学条件等内容建立选址评价指标,完成人工鱼礁选址过程。但层次分析法在建立层次结构模型过程中需要对各准则

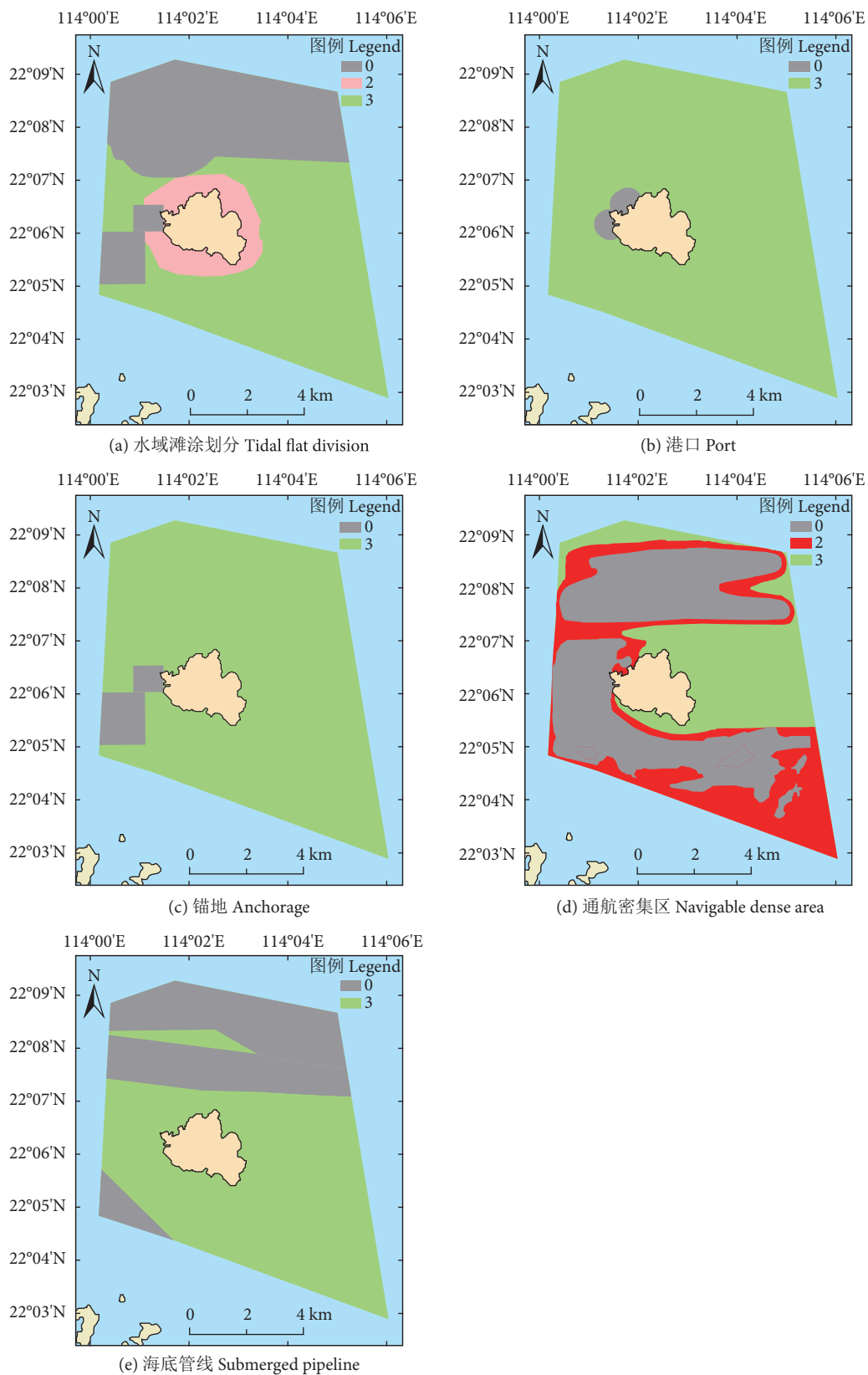


图4 外伶仃岛海域单项因子适宜性评价

Fig. 4 Suitability evaluation of individual factors in Wailingding Island sea area

进行对比, 主观性较强, 从而在评价准确性上可能存在偏差^[8]。本文使用建立评价指标体系的方法进行海洋牧场选址, 说明了排除区域不适合作为海洋

牧场选址的原因, 具有较强的客观性。评价结果中适宜建设海洋牧场的区域与外伶仃岛已建人工鱼礁区、已规划海洋牧场区范围较相近, 进一步验证了

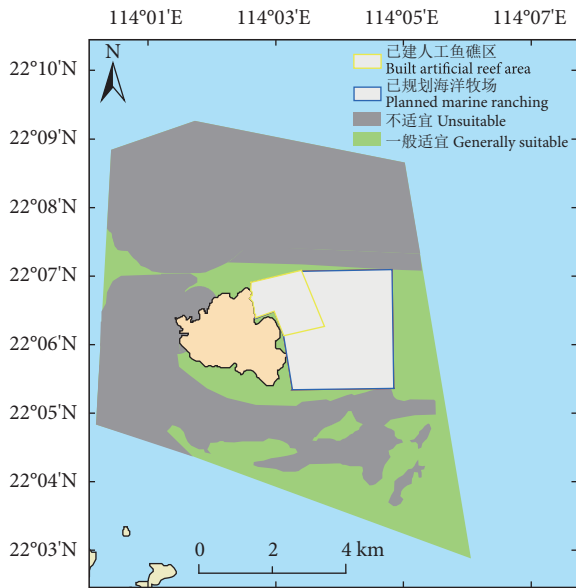


图5 珠海外伶仃岛海洋牧场选址适宜性评价结果

Fig. 5 Suitability evaluation results of marine ranching site selection in Wailingding Island sea area

本研究建立的评价指标体系方法的可行性和合理性,可为外伶仃岛海洋牧场建设提供技术支撑和参考依据,同时也为我国海洋牧场选址适宜性评价提供借鉴。

许妍等^[9]在2016年同样使用构建指标体系的方法对天津市人工鱼礁选址进行适宜性评价,并证明研究结果具有可行性。许强等^[22]在对舟山市海洋牧场进行初步选址研究时,选取排除图层的内容仅提出考虑海洋功能区划符合性;Erftemijer等^[5]选取排除图层内容时,基于研究区域考虑到管道、电缆、锚地、保护区水深小于5 m的区域等指标,上述研究中的指标体系均不完整,本研究充分考虑研究区域内地理条件用海符合性,对提高海洋牧场选址评价的科学性、有效性和准确性具有较好的参考价值。

3.3 不足与展望

选址是海洋牧场建设的重要环节,科学开展选址工作,是确保海洋牧场在提供生态廊道、保护野生种群、调节流场和物质运输等方面发挥重要作用的基础^[31]。一个恰当的选址过程对海洋牧场建设的成功至关重要,许多研究经验表明,选址建设比后续任何一个环节都更加重要^[32]。在许多情况下,不良的选址被认为是未能达到预期目标的重要原因^[33]。本研究中对海岸线分析,提取的是瞬时水边线,与实际海岸线存在一定误差,未来需要结合海岸线实际调查进行更深入的研究。此外,本研究说明海岸线稳定是适合建设海洋牧场的原因之

一,建立评价指标体系说明不适合建设海洋牧场的海域,但并未解释排除后的区域适合建海洋牧场的原因,后续需结合水环境数据、生物资源数据等进行更加深入的研究。

参考文献:

- [1] 陈丕茂,舒黎明,袁华荣,等.国内外海洋牧场发展历程与定义分类概述[J].水产学报,2019,43(9):1851-1869.
- [2] 崔晨,张云岭,张秀文,等.唐山祥云湾海洋牧场渔业资源增殖效果评估[J].河北渔业,2021(1):25-31.
- [3] 罗文强,赵刚,张彦彦,等.海州湾海洋牧场人工鱼礁区建设前后海洋环境变化分析[J].海洋湖沼通报,2021:33-40.
- [4] 张涛,奉杰,宋浩.海洋牧场生物资源养护原理与技术[J].科技促进发展,2020,16(2):206-212.
- [5] ERFTEMIJER P, GRAAFF R D, BOOTO G, et al. Site selection for artificial reefs in Bahrain (Arabian Gulf) based on GIS technology and hydrodynamic modelling[J]. J Mar Sci Environ, 2004 (C2): 29-38.
- [6] 许强.海洋牧场选址问题的研究[D].上海:上海海洋大学,2012:1-78.
- [7] 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.
- [8] 李英雪.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,2019:1-62.
- [9] 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.
- [10] 冯英明,许丙彩,郝义,等.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,2020,36(1):44-50.
- [11] 许强,章守宇.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,2013,22(1):128-133.
- [12] 贾后磊,谢建,彭昆仑.人工鱼礁选址合理性分析[J].海洋开发与管理,2009,26(4):72-75.
- [13] 刘富强,吴涛,蒋国俊,等.海岸线与海岸景观格局对人为干扰度的动态响应——以营口市南部海岸为例[J].生态学报,2017,37(22):7427-7437.
- [14] 张玉新.海上丝绸之路海海岸线时空变化特征研究[D].烟台:中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所),2021:40-73.
- [15] 广东省人民政府.广东省海洋功能区划(2011-2020)[Z].2016:10-12.
- [16] 胡斌,陈妍.论海洋生态红线制度对中国海洋生态安全保障法律制度的发展[J].中国海商法研究,2018,29(4):94-101.
- [17] 广东省人民政府.广东省海洋生态红线[Z].2017:36-45. http://nr.gd.gov.cn/zwgknew/tzgg/gg/content/post_3559716.html.
- [18] 中华人民共和国农业农村部.国家级海洋牧场示范区管理工作规范[Z].2019:1-3. http://www.yyj.moa.gov.cn/gzdt/201909/t20190917_6328072.htm.
- [19] 珠海市海洋农业和水务局.珠海市养殖水域滩涂规划(2018-2030)[Z].2018:27-34. <http://www.zhuhai.gov.cn/nynncj/attachment/0/227/227899/2573803.pdf>.

- [20] 中国人民解放军司令部航海保证部, 中国航路指南(南海海区) [M]. 天津: 中国航海图书出版社, 2011: 15379.
- [21] 黄杰, 王权明, 黄小露, 等. 国土空间规划体系改革背景下海洋空间规划的发展 [J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(5): 14-18.
- [22] 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.
- [23] 张晓龙, 刘乐军, 李培英, 等. 中国滨海湿地退化评估 [J]. 海洋通报, 2014, 33(1): 112-119.
- [24] 牙韩争, 许尤厚, 李谊纯, 等. 岸线变化对钦州湾水动力环境的影响 [J]. 广西科学, 2017, 24(3): 311-315.
- [25] 左军成, 左常圣, 李娟, 等. 近十年我国海平面变化研究进展 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015(5): 442-449.
- [26] 李加林, 王艳红, 张忍顺, 等. 海平面上升的灾害效应研究——以江苏沿海低地为例 [J]. 地理科学, 2006(1): 87-93.
- [27] 黄伟, 曾江宁, 陈全震, 等. 海洋生态红线区划——以海南省为例 [J]. 生态学报, 2016, 36(1): 268-276.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] MOUSAVI S H, DANEHKAR A, SHOKRI M R, et al. Identification of effective criteria for artificial reefs site selection using analytical hierarchy process methodology (a case study: coral reefs in the Kish Island) [J]. Oceanography, 2011, 2(5): 78-91.
- [31] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望 [J]. 水产学报, 2016, 40(7): 1133-1140.
- [32] BOHNSACK J A, SUTHERLAND D L. Artificial reef research: a review with recommendations for future priorities [J]. B Mar Sci, 1985, 37(1): 11-39.
- [33] BAINE M. Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance [J]. Ocean Coast Manage, 2001, 44(3): 241-259.