

Si Z Q, Li C L, Yin Z X, et al. Suitability assessment for *Crassostrea gigas* reef restoration in Shandong coastal waters based on remote sensing and GIS [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(1): 012612. [斯张琦, 李春霖, 尹子旭, 等. 基于遥感和GIS的山东近海长牡蛎礁修复适宜性选址研究 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(1): 012612.]

基于遥感和GIS的山东近海长牡蛎礁修复适宜性选址研究

斯张琦¹ 李春霖¹ 尹子旭¹ 项乐^{2*} 刘阳^{1,3*}

(1. 中国海洋大学水产学院, 青岛 266003; 2. 青岛市环境卫生发展中心, 青岛 266003; 3. 中国海洋大学, 海洋渔业卫星应用研究联合实验室, 青岛 266003)

摘要: 研究以山东半岛沿岸海域为研究区域, 结合历史文献确定对适宜长牡蛎(*Crassostrea gigas*)生长及牡蛎礁修复有重要影响的海洋环境、栖息地及社会经济因素并划分相关因素阈值范围及最适条件, 基于地理信息系统(GIS)与层次分析法(AHP), 综合2011—2020年的卫星遥感数据、数值模型数据、测深数据及社会经济数据, 通过R语言进行空间叠加分析与时空统计, 构建一套综合评价山东沿海长牡蛎礁修复的适宜指标体系, 并探究其适宜性时空分布规律与环境影响机制。结果表明: 山东近海长牡蛎礁修复适宜性总体以中、低适宜区为主, 高适宜区主要分布于莱州湾东南部、烟台北部沿岸、荣成桑沟湾及乳山南部海域; 适宜性季节特征明显, 呈“冬缩夏扩”的演变规律; 适宜性指数大于0.5的面积所占比例总体呈上升趋势, 且存在明显的季度变化, 与海水表面温度(SST)相关性最强, 随着SST的升高而显著增加, 与总悬浮颗粒物(TSS)呈负相关; 基于适宜性的长牡蛎礁生态效益分析表明, 夏季研究区域内有5个潜在的长牡蛎礁核心生境, 呈现较为均匀的斑块状分布, 可在近海形成较高的生态连通性, 为牡蛎幼体扩散通道提供适宜环境条件。研究结果为山东近海长牡蛎礁生态修复的科学选址提供了理论依据。

关键词: 牡蛎礁修复; 适宜性选址; 长牡蛎; 地理信息系统

中图分类号: S931.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2026)01-012612-17

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0185 **CSTR:** 32229.14.SSSWXB.2025.0185



牡蛎礁是由大量活体牡蛎、死亡牡蛎的壳及礁区其他生物共同堆积、固着生长于硬底物表面所形成的一种生物礁系统, 主要分布于潮间带和潮下带^[1]。作为河口和海湾地区重要的栖息地类型, 牡蛎礁在维持沿海生态系统稳定性及生物多样性等方面发挥着重要的作用。牡蛎能够过滤水体中的悬浮物, 提高水体透明度, 促进浮游植物进行光合作用, 提高水域环境的初级生产力^[2]; 牡蛎的壳是多种微生物进行硝化作用的场所, 海湾和河口的牡蛎礁可以有效降低水体富营养化程度^[3]; 牡蛎礁的立体空间结构, 为沿海地区多种鱼类和海洋底栖动

物提供栖息地与避难所^[4]; 牡蛎礁作为天然屏障, 能够减少波浪能量, 保护海岸线免受侵蚀^[5]。

海洋和海岸带是人类社会的重要资源, 然而, 所有沿海生境都不可避免地受到人类活动的影响, 过度利用和不可持续的开发破坏了沿海生态系统的稳定性并导致资源枯竭。牡蛎礁是当今地球上受破坏最严重的海洋栖息地之一, 仅在过去的两个世纪中, 全球近85%的牡蛎礁已经退化, 造成河口环境恶化及渔业资源退化等影响^[6]。同时, 随着海岸带的历史变迁, 大量牡蛎礁被埋入地下成为古牡蛎礁^[7]。历史上, 牡蛎礁曾广泛分布在我国温带和

收稿日期: 2025-05-31; **修订日期:** 2025-08-11

基金项目: 国家自然科学基金“气候变化对太平洋牡蛎养殖适宜性动态的影响研究”项目(41976210)资助 [Supported by National Natural Science Foundation of China “Study on the Dynamic effects of Climate Change on the Suitability of *Crassostrea gigas* Culture” Project (41976210)]

作者简介: 斯张琦(2000—), 女, 硕士研究生; 主要研究方向为渔业遥感。E-mail: sizhangqi@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 项乐(1980—), 女, 副高级工程师; 主要研究方向为环境保护。E-mail: 84255839@qq.com 刘阳(1981—), 男, 教授, 博士生导师; 主要研究方向为渔业遥感。E-mail: yangliu315@ouc.edu.cn *为共同通信作者

亚热带海区的潮间带和浅水潮下带,近年来,我国天然牡蛎礁仅零星分布在天津大神堂、山东莱州湾、江苏小庙洪、福建深沪湾、江苏海门蛎岬山等区域^[8]。天然牡蛎礁的面积显著下降,分布区不断缩小,亟须开展对牡蛎礁现状的调查研究及人工修复工作。

生态修复被视为一种可持续发展策略,通过修复和保护生态系统,实现经济发展与生态保护的平衡。自20世纪60年代起,美国尝试在切萨皮克湾沿岸修复因过度捕捞而退化的牡蛎资源,结果证明,通过选择合适的修复地点并采取相应的修复措施可重建牡蛎礁体并恢复其生态系统功能^[9]。联合国可持续发展目标、《巴黎协定》等都强调了生态修复的重要性,越来越多的国际合作组织都倡议将牡蛎礁生态修复作为海洋和海岸带管理的重要组成部分,并呼吁各国采取行动保护和恢复海洋生态系统^[10]。由此可见,牡蛎礁修复已经在世界范围内受到重视。

选址是牡蛎礁修复工程的关键环节,若选址区域存在幼虫补充量不足或周期性低溶解氧事件等不利环境因素,将导致修复后的礁体难以持续发育^[11]。传统牡蛎礁修复工程多依托牡蛎礁的历史分布数据进行选址和修复策略制定,例如在牡蛎礁历史分布区进行修复重建,然而,现存牡蛎礁不仅数量稀少,其环境承载力也因气候变化导致的水温异常、酸化加剧及人为造成的污染等原因而显著下降。这种双重退化导致依赖历史分布数据的选址策略逐渐失去优势,亟须通过多参数评估重新划定修复区,充分考虑海域水质和水动力环境、栖息地、社会经济等因素,在非历史分布区构建新的功能性礁体^[12]。

卫星遥感克服了传统观测手段在空间覆盖范围方面的局限性,凭借其广域覆盖的能力,在大范围的沿海区域动态监测中具有显著的优越性^[13],并能够通过多源传感器协同观测获取长时间序列数据集,为研究环境变化趋势、气候变化对海洋生态系统的影响及长期生态恢复项目的监测提供数据支持;同时在数据的时空分辨率和种类上提供了更多的选择。地理信息系统(GIS)是处理和分析空间数据的常用工具,具有强大的空间数据集成、数据叠加分析、模型构建和自动化处理以及结果可视化能力,在遥感数据解析与海洋生境评估中具有显著优势^[14],R语言是一种能够与地理空间数据交互、实现GIS功能的编程语言。GIS可与多准则评价法(Multi-Criteria Evaluation, MCE)相结合,将多个影响牡蛎礁恢复的关键因子纳入决策过程,构建

基于多因子分析的适宜性模型。层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)允许根据对多个标准的相对重要性进行比较,为复杂生态修复决策提供结构化的判别框架^[15]。然而,AHP中权重的分配往往基于主观性的判断,可能影响结果的可靠性^[16],且复杂性会随着标准的增加而增加,因此需要综合已有文献研究和调查等资料提出合理的权重分配。将GIS和AHP结合能够为适宜性选址提供全面框架,确保模型在较大空间尺度进行全面分析的准确性和有效性^[17]。

本研究旨在构建长牡蛎礁修复适宜性评价模型,对山东近海长牡蛎礁修复适宜性的时空分布特征进行整体评估,以确定潜在的长牡蛎礁适宜修复区,并探究基于时间序列的适宜性驱动机制,最终确定基于修复适宜性的长牡蛎礁核心生境。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究以山东半岛沿岸海域作为研究区域(35°42'0"—38°12'0"N, 118°48'0"—122°52'7"E)(图1)。山东半岛位于中国东部,毗邻黄海和渤海,属温带季风气候,四季分明,夏季相对温暖,冬季较为寒冷,年降水量适中。山东半岛地形相对平坦,沿海多为低洼沙滩和平原,沉积物类型主要为盐土质粉砂^[18]。潮间带浅滩宽阔,波浪、潮流和缓,省内有多条河流入海,主要包括黄河、小清河和弥河等。受入海河流及海洋的影响,山东半岛沿岸海域水温适宜,盐度适中,具有较高的海洋生物多样性,适合牡蛎礁修复。

历史上山东半岛沿岸曾有多处天然牡蛎礁分布区,主要集中分布在蓬莱、长山特区、烟台等地和各大河流入海口及莱州湾沿岸海域^[19],其中,小清河入海口曾是牡蛎礁核心分布区,但20世纪末因污染退化^[20]。近30年来山东天然牡蛎礁缩减90%以上^[21],目前现存天然牡蛎礁和修复工程主要分布于黄河三角洲滨海湿地修复区、黄河口西南侧的小岛河河口、东营垦利海区、潍坊北部沿海区、滨州港附近及莱州湾西岸^[22]。天然牡蛎礁筑礁物种以近江牡蛎(*Crassostrea ariakensis*)和长牡蛎(*Crassostrea gigas*)为主,然而近年来近江牡蛎野生种群迅速减少,种质资源退化严重,人工育种技术尚未成熟,不适宜作为牡蛎礁人工修复的筑礁物种进行投放^[23]。根据山东近海的环境和牡蛎礁历史分布情况,本研究以山东近海主要牡蛎养殖物种且同样能够提供生态效益的长牡蛎作为筑礁物种,所考虑的牡蛎礁修复选址情况为海水环境中的重建型修

复,即底质物和幼苗补充量同时受限的情况,综合考虑影响底质物投放、长牡蛎生长、基础设施的支持等因素。

1.2 影响长牡蛎生长及牡蛎礁修复的因素

适宜性选址是牡蛎礁修复流程中的关键步骤。需综合考虑海水环境、牡蛎礁栖息地和社会经济因素对长牡蛎生长及牡蛎礁修复的影响,以确保修复后牡蛎礁能够持续生长并产生预期的生态效益^[24]。

海洋环境包括盐度、温度、营养及水流等生存基础条件,直接影响牡蛎生长繁殖及礁体发育。叶绿素 a 浓度是浮游植物生物量的主要指标,而浮游植物是牡蛎重要的食物来源。故叶绿素 a 浓度的变化可以直接影响牡蛎的食物供应,从而影响牡蛎的生长速度和整体健康^[25]。悬浮颗粒物浓度影响牡蛎的滤食和附着,高浓度的悬浮颗粒物会导致沉积增加,掩埋牡蛎礁并使得牡蛎幼虫的有效附着物减少,从而显著影响牡蛎的生长和牡蛎礁体的构筑^[26]。夏季海水表面温度的升高会导致牡蛎呼吸速率提高并破坏牡蛎体内的氧化-抗氧化平衡^[27]。此外,海水表面温度的变化还会影响繁殖期牡蛎的配子发生率和性别比例^[28]。沿海水域短期内盐度的迅速变化会影响牡蛎的生理机能和离子传输能力^[29]。夏季海水盐度急剧下降加上高温胁迫会破坏牡蛎内部微生物平衡并引发免疫失调,最终导致牡蛎大规模死亡^[30]。牡蛎礁的形态,包括其高度和结构受到流速的影响,过高的流速会使牡蛎礁稳定所需的有效附着物减少从而限制牡蛎礁的生长^[5]。但在未达到与深度相关的流速阈值前,牡蛎的食物通量会随着水流速度的增加而增加。

栖息地因素直接影响牡蛎礁的构造及抵御环

境胁迫的能力,是维持其生态功能的关键基础。深水区域因光照衰减导致初级生产力受限,同时高静水压力环境会抑制牡蛎的生物酶活性并降低代谢效率^[31]。牡蛎礁作为天然防波堤,其减少波浪能量和保护海岸线的能力受海底坡度的影响,缓坡上的礁体更稳定且不易被侵蚀^[32]。

人类活动对沿海环境造成重大影响,故需要将经济社会因素整合^[33]。污水处理厂周围海域水质较差,海岸线和生物栖息地易受侵蚀^[34]。而靠近城镇、历史牡蛎礁区^[20]、牡蛎养殖区及码头能够为牡蛎礁修复提供更便捷的基础设施支持及长牡蛎苗种补充,利于牡蛎礁修复工作的进行^[35]。

此外,气象和气候因素往往通过影响海洋环境,间接对牡蛎礁造成影响。受厄尔尼诺-南方涛动影响的降水会影响牡蛎礁周围水体的盐度水平。在厄尔尼诺时期之后,海水盐度降低,牡蛎数量和密度增加,牡蛎礁区物种丰富度及密度减少;而拉尼娜时期之后海水盐度水平较高且波动不大,牡蛎附着率较高^[36]。另一方面,水体流量与风速增加成正比,在海风的驱动下,波浪会塑造牡蛎礁结构,并反过来影响牡蛎礁消散波浪能的能力^[37]。

1.3 数据获取及预处理

根据上述影响因素,本研究获取并处理了研究区域内的海水环境、栖息地及社会经济数据。本文使用的地图底图来源于国家地理信息公共服务平台(<https://www.tianditu.gov.cn>),审图号:GS(2024)0650号。

海水环境因素包括叶绿素 a (Chlorophyll a , Chl. a)浓度、海水表面温度(Sea Surface Temperature, SST)、总悬浮颗粒物(Total Suspended Sediment, TSS)浓度、海水盐度(Sea water salinity, Sal)和流速(Veloci-

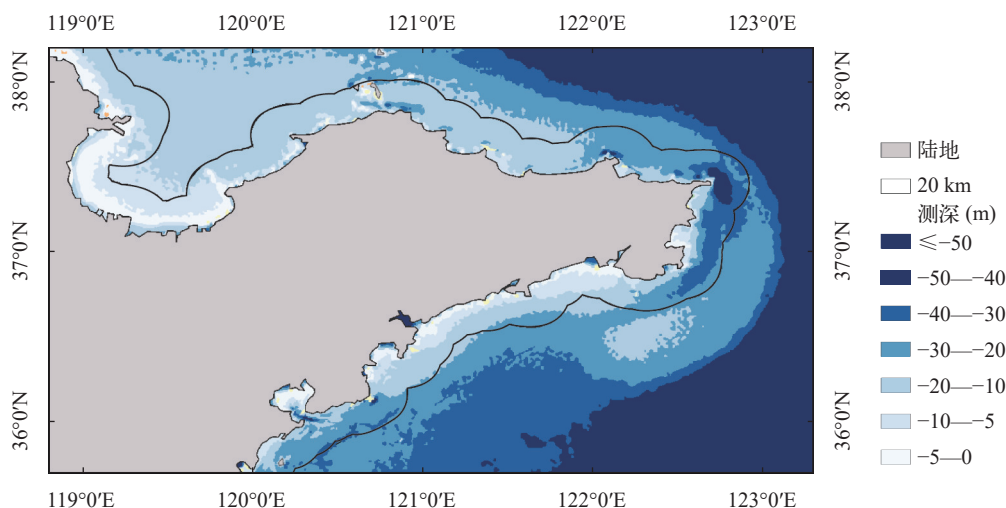


图1 山东近岸海域

Fig. 1 Coastal sea area of Shandong Province

ty, VO)。Chl.*a*和TSS来源于静止轨道海洋水色卫星CMOS所携带的海洋水色成像仪(Geostationary Ocean Color Imager, GOCI), 可以从韩国海洋卫星中心(Korea ocean satellite center <http://kosc.kiost.ac.kr/index.nm>)获取L1级数据, 分辨率为500 m, 需要对初始数据进行波段计算和几何校正。SST数据来源于美国航空航天局发射的太阳同步极轨水色卫星AQUA所携带的中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS), 从海洋颜色网站(<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>)获取L2级逐日数据, 分辨率为1 km, 进行大气校正、数据筛选后求月平均值。Sal和VO的月平均数据来源于哥白尼海事服务(E.U. Copernicus Marine Service Information, CMEMS, Marine Data Store, MDS), VO由东向海水速度(Eastward sea water velocity)和北向海水速度(Northward sea water velocity)的平方和开方求成^[38]。

栖息地因素包括测深(Bathymetry)和坡度(Bottom slope)。测深数据来源于世界大洋深度图(General Bathymetric Chart of the Oceans, GEBCO, <https://www.gebco.net>)的全球水深网格数据, 分辨率为500 m。坡度以测深数据为基础, 通过Arcgis的表面坡度功能计算得到。

社会经济因素包括城镇(City)、码头(Pier)、污水处理厂(Wastewater Treatment Plants, WWTPs)、沿岸陆地养殖(Land aquaculture, L-aqua)和海水养殖(Sea aquaculture, S-aqua)的空间分布, 以及历史牡蛎礁的分布(Distribution of Historical oyster reefs, Reef)。城镇数据采用全球多时相的城市边界数据^[39]。码头数据采用的是在相关地图服务中提取的沿海周边相关兴趣点(Point of Interest, POI)数据。WWTPs的数据来源于HydroWASTE全球数据库。采用ArcGIS 10.7计算得到社会经济数据的欧氏距离数据, 格式为tif。海岸带近岸陆侧池塘养殖区, 以及近海海水养殖区从中国海岸带地区水产养殖数据集(2020年)中提取, 数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>); 牡蛎礁分布数据来源于全球生物多样性信息机构(Global Biodiversity Information Facility, GBIF)及相关调查研究。

本研究获取了气象数据, 包括10 m高度层风速(Wind Speed, WS)、总降水量(Total Precipitation, Pr)、地表上方2 m温度(2 m Dewpoint Temperature, Tas)。其中WS、Pr、Tas数据源自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)的ERA5再分析月平均数据集, 同时获取

了海洋尼诺指数(Oceanic Niño Index, ONI)、多元厄尔尼诺指数(Multivariate ENSO Index, MEI)和北极涛动指数(Arctic Oscillation Index, AOI)等全球气候变化指数。

所获取的数据为2011年5月到2020年12月的月平均时间序列数据, 将所有数据格式转换为tif, 选取Chl.*a*数据作为基准栅格, 对所有数据进行插值, 重采样至相同分辨率, 重投影至相同坐标系WGS 1984 (World Geodetic System 1984)。

1.4 牡蛎礁修复适宜区选址模型构建

本研究对得到的栅格数据进行重分类, 通过查阅文献或实验研究, 确定长牡蛎生存、生长的环境最适范围和阈值。当环境变量值在最适范围内时, 适宜性指数为1, 当在阈值和最适范围边界之间时, 适宜性指数线性下降, 当超出阈值时, 适宜性指数为0, 构建适宜性指数函数, 对栅格数据中的每个像元值应用适宜性指数函数, 计算每个像元的适宜性指数^[40]。

模型采用层次分析法来确定每个因素的权重。本研究所构建层次评价模型的目标层为选择牡蛎礁潜在适宜修复区域, 准则层为海洋环境、栖息地及社会经济三类因素, 子准则层为各类因素中的各个因素。可以通过专家知识, 经验和其他可量化的指标构建判断矩阵, 采用Saaty^[41]提出的1—9标度法, 行与列相比较, 1表示两个因素同等重要, 3表示一个因素比另一个因素稍微重要, 5表示明显重要, 7表示强烈重要, 9表示极端重要, 2、4、6、8为中间值, 通过对各因素进行两两比较, 从而确定它们之间的相对重要性程度, 构建判断矩阵 A :

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

依据构建好的判断矩阵, 求解各个指标的权重;

采用算术平均法计算权重 w , 将判断矩阵每列元素除以该列之和, 对每一列进行归一化, 得到归一化后的矩阵 A' :

$$A' = (a'_{ij}) \quad (2)$$

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

对归一化矩阵按行求和, 再除以指标数量 n , 得到各因素的权重, 各因素权重集合为权重向量:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a'_{ij} \quad (4)$$

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T \quad (5)$$

对判断矩阵进行一致性检验, 首先计算判断矩阵与权重向量的乘积, 计算最大特征值 $\lambda_{\max}$:

$$(A_w)_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad (6)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A_w)_i}{w_i} \quad (7)$$

计算一致性指标CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

根据表1计算一致性比率CR, RI为平均随机一致性指标可根据指标数量查表得到:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (9)$$

若 $CR < 0.1$, 则认为判断矩阵一致性可接受, 否则需要修正矩阵。

如图2所示, 本研究基于R语言构建山东近海长牡蛎礁修复适宜性选址模型, 完成对数据的预处理、重分类、加权叠加等过程, 并生成2011—2020年

牡蛎礁修复适宜性空间分布图, 包括各因素的重分类适宜性、各子模型适宜性及最终适宜性。适宜性指数从0—1表示适宜性从低到高, 适宜修复区的选择应具备一定的适宜性^[42], 同时长时间序列依据概率密度分布的适宜性阈值(如前5%^[43]所对应的阈值)会导致高适宜性面积所占百分比固定而影响后续分析。因此按照适宜性指数0—0.3为不适宜区域, 0.3—0.5为低适宜区域, 0.5—0.7为中适宜区域, 0.7—1.0为高适宜区域进行适宜性等级划分。

1.5 适宜性的时空分布特征统计

根据生成的适宜性分布图, 对适宜性指数进行分级, 统计各个适宜性等级的空间占比, 以更直观的方式判断适宜性的空间分布情况和随时间的变化。统计适宜性占比(Habitat Suitability Proportion, HSP)在2011—2020年的时间序列, 进行时间序列分析, 应用STL (Seasonal-Trend-Loess)分解将时间序列数据拆解为趋势、季节和残差三个主要组成部分, 总结高分占比的季节模式、长期趋势及残差特征, 并将其与相关性分析中相关性较高的因素的时间序列规律进行对比, 以揭示其内在联系。

表1 随机一致性RI表

Tab. 1 Random Consistency RI table

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

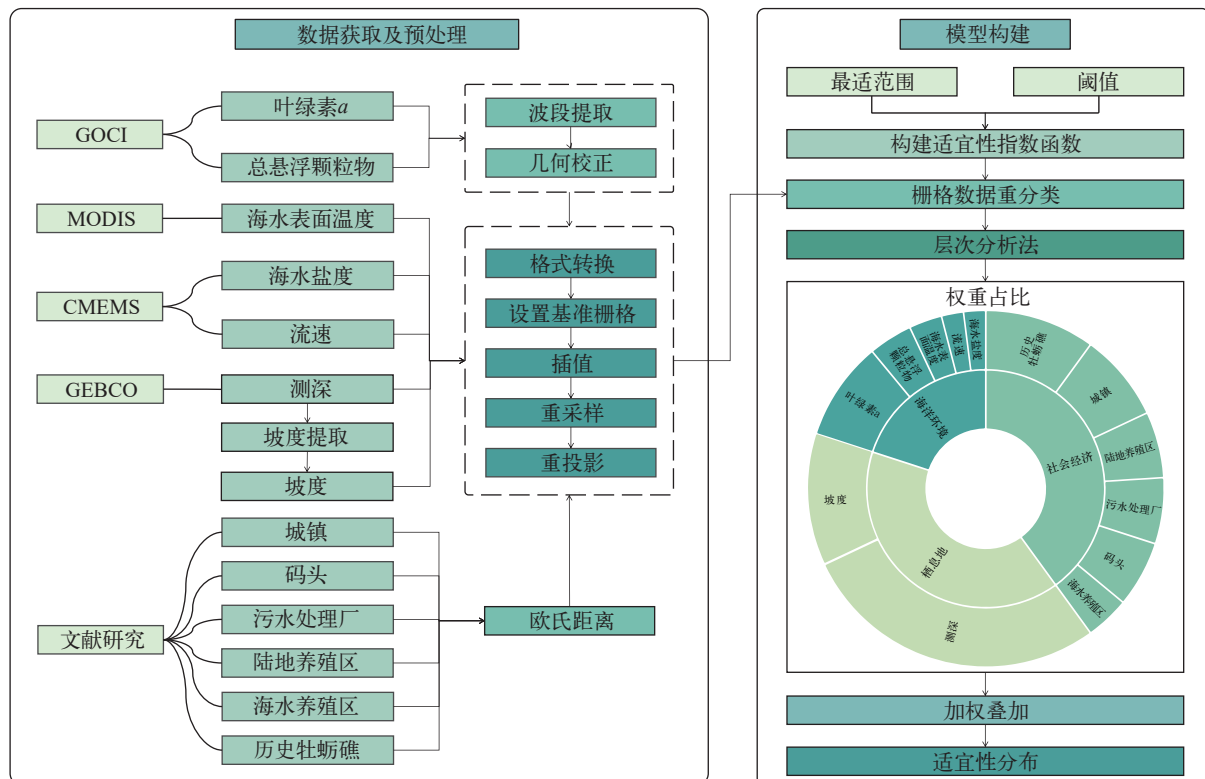


图2 技术路线图

Fig. 2 Technology Roadmap

1.6 适宜性占比与海水环境因素、气象气候指数的相关性分析

深入探究牡蛎礁修复适宜性与气象因素和气候因素之间的关系, 将HSP与气温、降水、风速等气象因素, 海洋尼诺指数(ONI)、多元厄尔尼诺指数(MEI)、北极涛动指数(AOI)等气候指数进行相关性分析, 以探究适宜性的主要影响因素。进一步通过时间序列的超前滞后分析, 得到HSP与皮尔逊相关性分析中非相关性因素的交叉相关性图(Cross-Correlation Function Plot), 以考虑部分因素可能带来的滞后影响, 为HSP的成因提供依据。

1.7 基于适宜性的牡蛎礁核心生境及最低成本路径分析

基于生成的适宜性空间分布特征进行生态学分析, 提取高适宜性区域并进行连通区域的识别, 通过设定连通区域的面积阈值(栅格数量)筛选符合条件的高适宜性区域作为潜在核心生境, 计算核心生境质心坐标, 并计算核心生境之间的最小成本距离, 得到最低成本路径(Least-cost Path, LCP)^[44]。依据核心生境和最小成本路径讨论长牡蛎修复的适宜性条件及其对牡蛎礁生态效益的重要意义^[45, 46]。

2 结果

2.1 长牡蛎礁修复适宜区选址模型

表2为最终确定的长牡蛎礁修复适宜性各因素适宜区间和阈值, 以及各因素和子模型的权重。本研究中海洋环境子模型占比20%, 包括Chl.a、SST、TSS、Sal、VO等海洋环境因素在2011—2020年的月平均数据。在子模型中, Chl.a占比45%, 其浓度高于5 mg/m³作为评估水体生态危害的高浓度阈值^[45],

然而, 研究区域内Chl.a浓度始终未达到上述危害阈值, 故将Chl.a浓度作为正向指标, 即浓度越高, 对应的适宜性越高, 达到4 mg/m³后适宜性保持最高; TSS占比20%, 基于已有数据, 参照Malouf等^[47]的实验结果建立TSS的适宜性函数, 即在0—0.5 g/m³为高适宜性, 同样依据其实际浓度确定8 g/m³为最高阈值; SST占比15%, 根据O'Connor等^[48]的研究确定最适区间和阈值; Sal占比10%, 分级主要依据Wang等^[40], 即当Sal处于14‰—30‰时, 表现出最优适宜性, 当Sal偏离该最优区间时, 适宜性呈现线性递减; VO占比10%, 山东近海表层流速普遍较低, 将适宜区间设置为5—30 cm/s, 阈值设置为50 cm/s (图3)。

栖息地模型占比40%, 包括测深和坡度。在子模型中, 水深占比70%, 山东近海水深由近岸向远海逐渐递增, 最深不超过20 m, 未达到对牡蛎礁有害的深度阈值, 最适区间为2—10 m, 最低和最高阈值分别为1和20 m; 坡度在子模型中占比30%, 山东近海海底坡度较为一致, 起伏不大。

社会经济模型占40%, 包括与城市、码头、污水处理厂、沿岸陆上养殖、海水养殖及牡蛎历史礁区的距离, 以0—20为阈值, 线性升高或降低来确定适宜性, 其中与牡蛎礁的距离占比25%, 与城镇的距离占比20%, 与陆地养殖的占比为10%, 其余各个因素占比均为15%。

2.2 各因素适宜性的空间分布

海洋环境各因素适宜性的空间分布 海洋环境各因素适宜性的空间分布如图4所示, SST与Sal的高适宜区范围最广, 几乎覆盖研究区域内全部海域; TSS仅在莱州湾西岸和局部沿岸海域适宜性较低, 其余大部分海域均呈中高适宜性; Chl.a整

表2 长牡蛎礁修复适宜性各因素适宜区间和阈值

Tab. 2 Suitable interval and threshold of each factor in the restoration suitability of *Crassostrea gigas* reef

子模型 Sub-model	权重 Weight (%)	因子 Factor	权重 Weight (%)	最低阈值 Minimum threshold	最适范围 Range of optimum	最高阈值 Maximum threshold
海洋环境 Marine environment	20	叶绿素a Chl.a (mg/m ³)	9	0	—	4
		总悬浮颗粒物TSS (g/m ³)	4	0	0—0.5	8
		海水表面温度SST (°C)	3	10	15—25	30
		海水盐度Sal (‰)	2	0	14—30	32
		流速VO (m/s)	2	0.01	0.05—0.3	0.5
栖息地Habitat	40	测深Bathymetry (m)	28	-1	-10—-2	-20
		坡度Slope (°)	12	0	0—10	15
社会经济Social economy	40	码头Pier (km)	6	0	—	20
		城镇City (km)	8	0	—	20
		污水处理厂WWTPs (km)	6	20	—	0
		陆地养殖区L-aqua (km)	4	0	—	20
		海水养殖区S-aqua (km)	6	0	—	20
		历史牡蛎礁区Reef (km)	10	0	—	20

体适宜性较低, 仅在莱州湾西部出现几个连续的中适宜性斑块; VO不具有适宜性。

栖息地各因素适宜性的空间分布 栖息地各因素适宜性的空间分布如图5所示, 水深适宜性较高的区域集中分布于莱州湾沿岸及乳山南部近岸海域, 与不适宜区域相接, 缺少中低适宜性的平稳过渡; 坡度适宜性分布则呈现更广泛的适应性, 高适宜区几乎覆盖沿岸20 km内的所有海域, 反映山东沿海地形稳定性较高。故栖息地适宜性主要取决于水深条件, 莱州湾和乳山南部海域兼具水深与坡度的双重适宜性, 使其成为潜在生态修复区。

经济社会各因素适宜性的空间分布 经济社会各因素适宜性的空间分布如图6所示, 山东沿海整体城镇和码头的适宜性较高, 基础设施条件较好, 几个适宜性较高的海岸区域同样面临着污水处理厂排放污水的威胁, 适宜性较低; 沿岸陆地养殖和海水养殖分布广泛, 因此可以给长牡蛎礁的修复提供充足的种苗和场地支持, 适宜性较高。目前仅

在莱州湾沿岸有历史牡蛎礁分布, 因此仅在莱州湾适宜性较高。

2.3 各子模型适宜性的空间分布

2011—2020年山东近海各子模型及最终适宜性空间分布的结果如图7所示。结果表明, 山东近海20 km内海水环境整体均表现为低适宜性(约为100%); 高适宜性区域在栖息地适宜性子模型中占比46%, 主要位于莱州湾沿海和山东南部沿海; 社会经济子模型适宜性整体较差, 仅局部沿岸地区呈中适宜性, 整体保持由近岸向远海逐渐降低的趋势。在最终适宜性中, 不适宜区占比17%, 分布于东部和南部离岸较远的海区; 低适宜区域占比43%, 主要位于烟台东北部和威海东部海域; 中适宜区域占比37%, 主要位于莱州湾沿海和南部沿海海域; 高适宜区域占比3%, 零星分布于莱州湾东南部沿岸、烟台北部沿岸、荣成桑沟湾、乳山南部海域。与基于动态能量收支(Dynamic Energy Budget, DEB)理论得到的山东半岛长牡蛎秋冬季育肥养殖

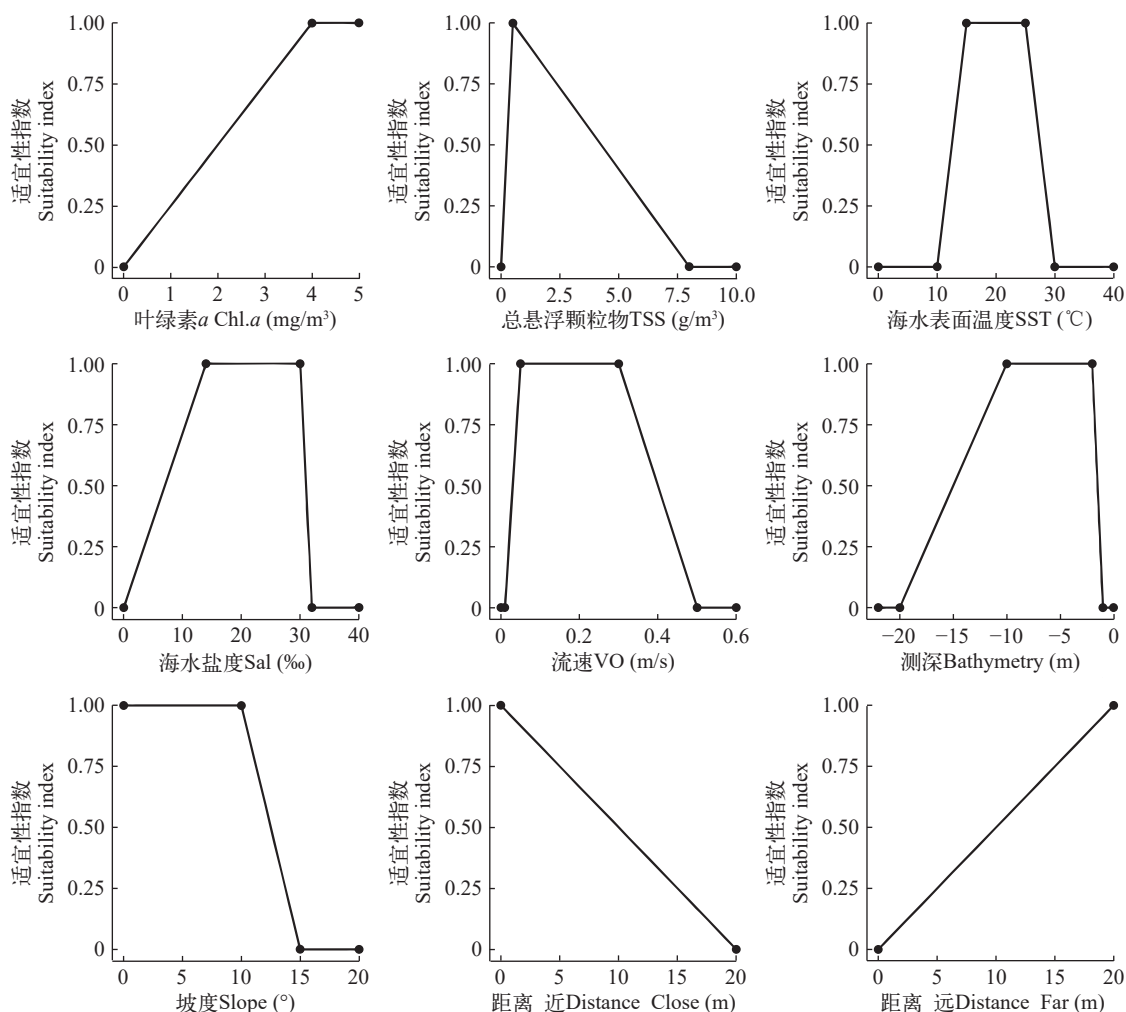


图3 长牡蛎礁修复适宜性各因素适宜区间和阈值

Fig. 3 Suitable interval and threshold of each factor in the restoration suitability of *Crassostrea gigas* reef

适宜区域结果相似^[49], 基本位于山东近海现有的长牡蛎主要养殖区内, 说明高适宜区具备满足牡蛎自然生存和基于人工养殖实践经验所选的适宜环境条件; 另外, 除荣成南部海域和桑沟湾等长牡蛎主

要养殖区, 高适宜区与国家级海洋牧场人工鱼礁建设海域基本一致^[50], 说明高适宜区基本符合及海洋牧场建设需求, 能够进行牡蛎礁等重要沿海栖息地的重建修复。

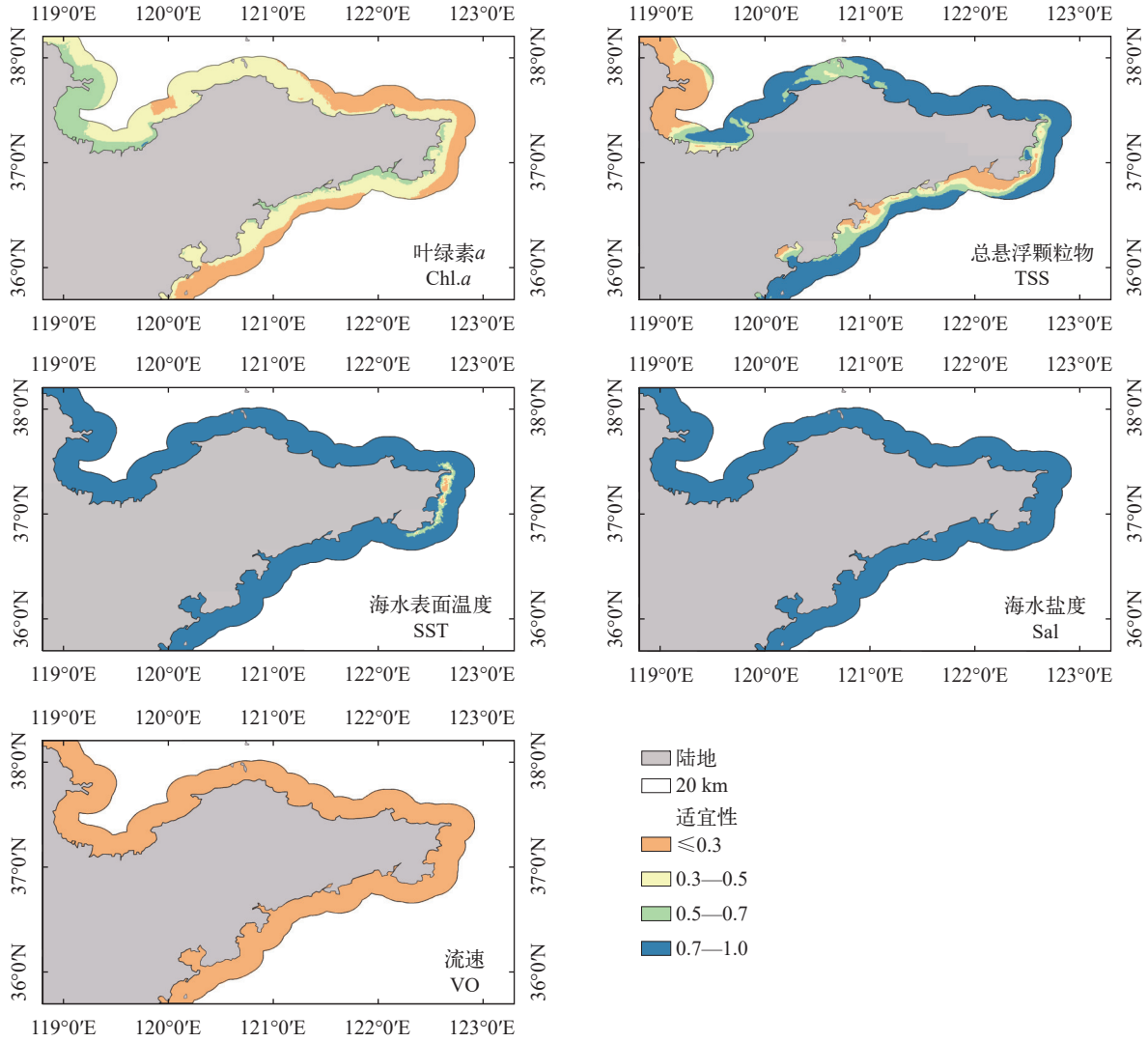


图4 2011—2020年海洋环境各因素适宜性的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of suitability of marine environmental factors from 2011 to 2020

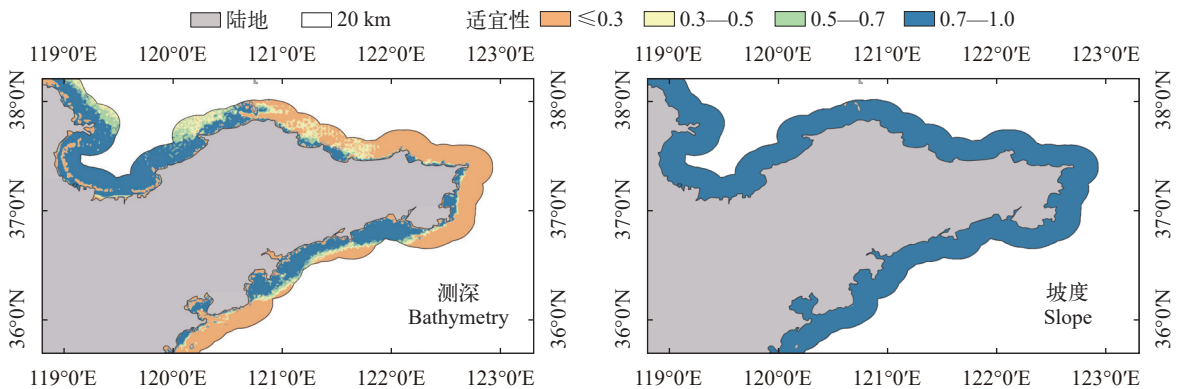


图5 栖息地各因素适宜性的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the suitability of habitat factors

2.4 适宜性的季度变化特征

如图8所示, 山东沿海牡蛎礁修复适宜区总体呈现“冬缩夏扩”的演变规律。春、冬季高适宜区占比较低, 集中分布于桑沟湾和乳山南部海域。在夏秋季, 中、高适宜区逐步扩张, 并在烟台北部和莱州湾东南部海域形成新的高适宜性分布区。整体来看, 中、低适宜区季节波动较小, 中适宜区占比稳定在35%—38%, 在高适宜区外围形成生态缓冲带, 低适宜区占比稳定在43%—44%, 分布在中适宜区与不适宜区之间, 适宜性从高到低从近岸向外海逐步过渡。

3 讨论

3.1 相关性因素的时间序列分析

本研究统计了2011—2020年山东近海适宜性指数高于0.5的区域占比(Habitat Suitability Pro-

tion, HSP)的时间序列, 如图9所示为HSP和海水环境因素的时间序列, 以及进行STL分解之后的长期趋势、季节模式和残差分析。季节模式分析表明, 2011—2020年HSP存在明显的季度变化, 夏季最高, 冬季最低, 与SST、VO的季节模式相似, 与TSS季节模式相反。HSP在长时间尺度上总体呈现上升趋势, 与SST整体持续上升的趋势一致, 2015和2019年出现短暂下降, Song等^[51]的研究中提到厄尔尼诺现象与SST异常之间存在的延迟相关性, 因此2015和2019年HSP和SST的下降可能与厄尔尼诺现象有关。TSS和VO无明显线性趋势。去除趋势和季节后, 所有残差无显著模式, 仅包含随机波动或不可预测的突发事件。

3.2 气候因素对适宜性的影响

本文将HSP时间序列与海水环境子模型各个

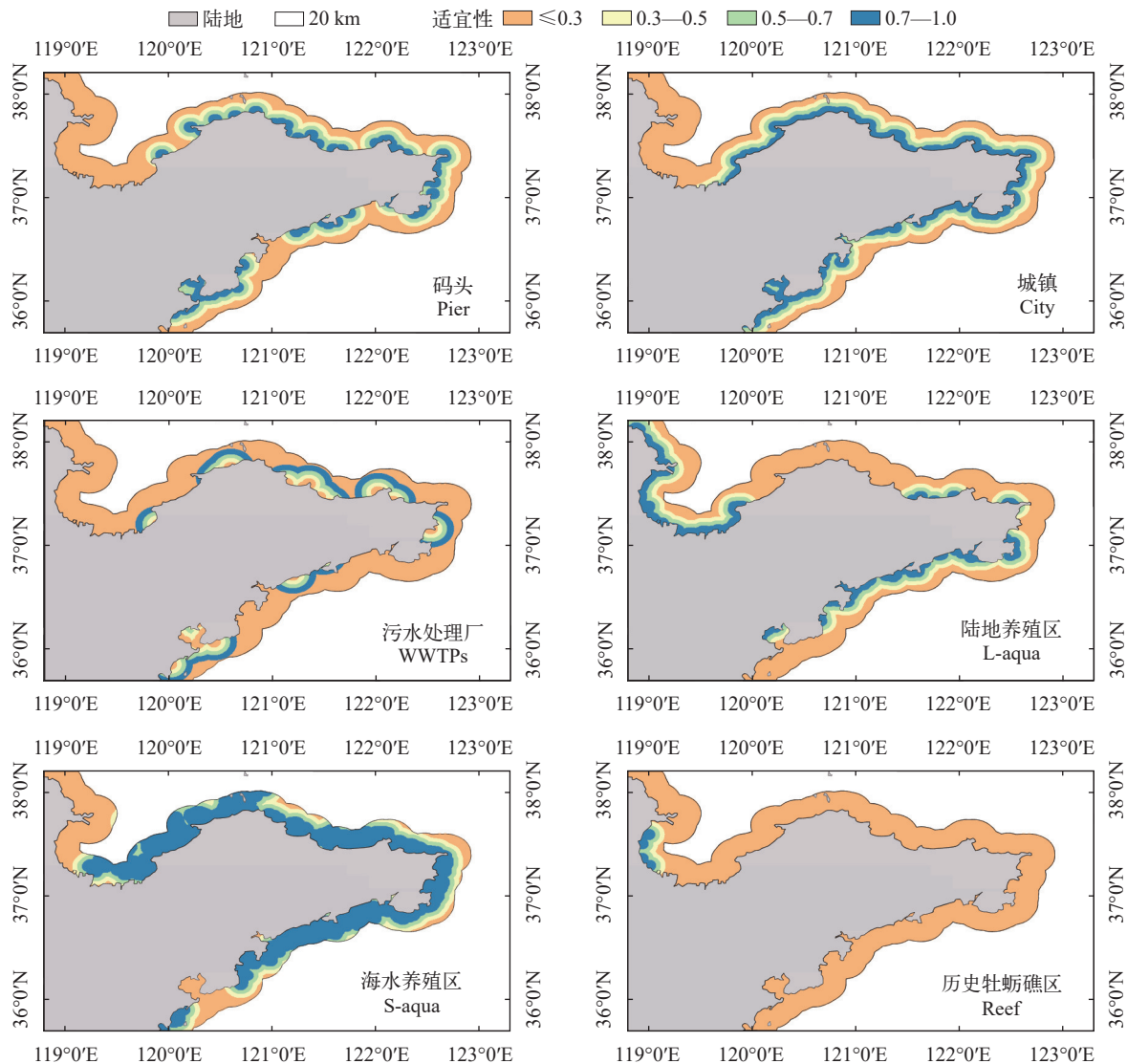


图6 经济社会各因素适宜性的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of suitability of economic and social factors

因子及气温、风速、降水等气象因素, ONI、MEI和AOI等气候指数进行皮尔逊相关性分析, 采用皮尔逊相关系数(Pearson Correlation Coefficient)衡量两个连续变量之间的线性相关程度和方向, **表示在0.01的显著性水平下显著, *表示在0.05的显著性水平下显著。

由图10可知, HSP与SST呈现极显著的强正相关关系($r^2=0.88$ 且 $P<0.01$), SST的变化对HSP的影响程度较大, HSP会随着SST的升高而显著增加; 与TSS呈现极显著的负强相关关系($r^2=-0.72$ 且 $P<0.01$), 与Chl.a呈现弱正相关关系($r^2=-0.27$ 且 $P<0.01$), 与VO呈现弱正相关关系($r^2=0.25$ 且 $P<0.01$)。ONI、

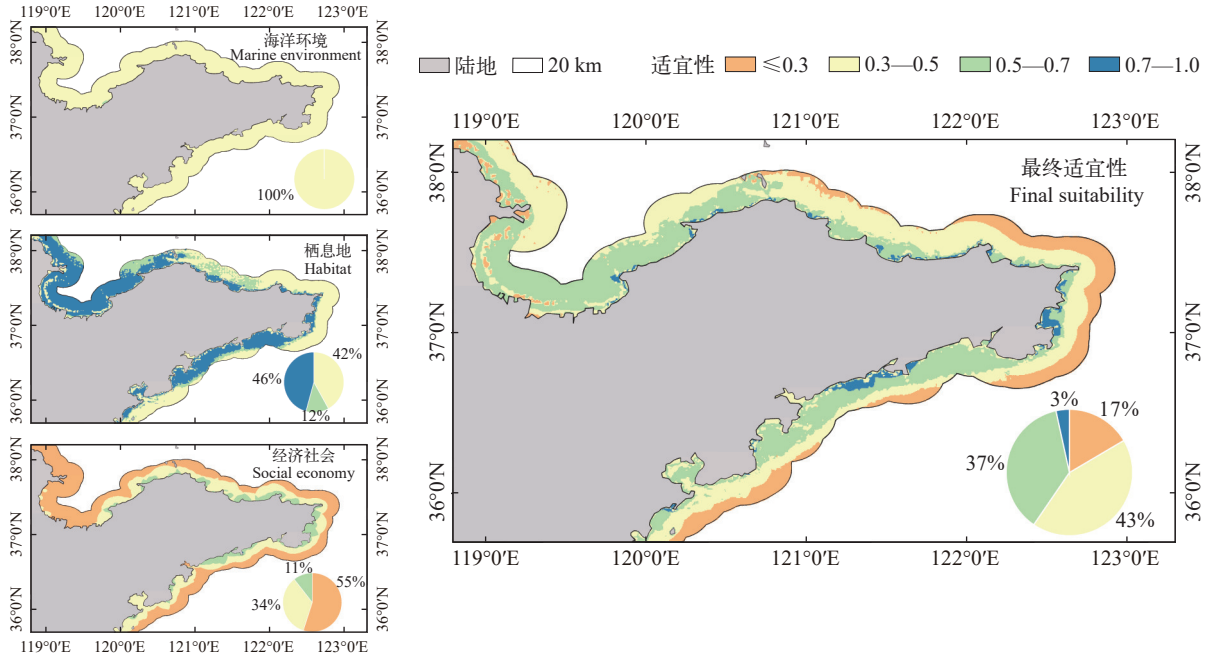


图7 2011—2020年各子模型及最终适宜性的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of each submodel and final suitability from 2011 to 2020

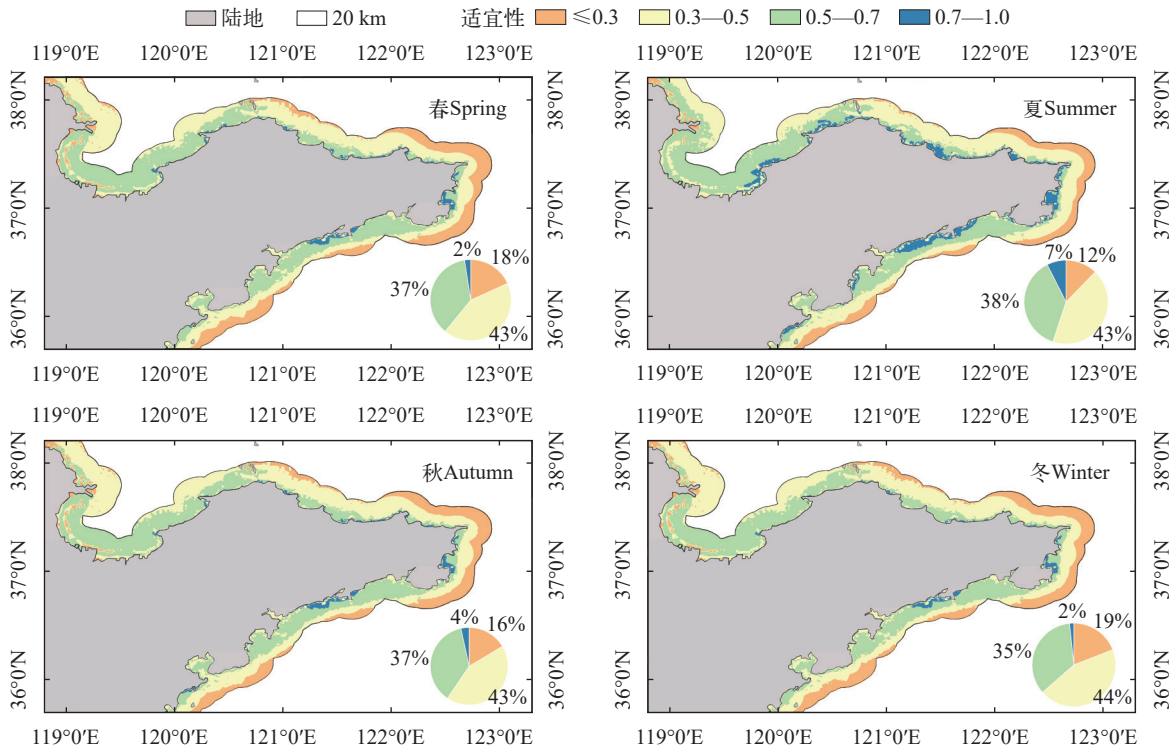


图8 2011—2020年长牡蛎礁修复适宜性的季度变化

Fig. 8 Seasonal changes in the suitability of *Crassostrea gigas* reef restoration from 2011 to 2020

MEI、AOI与HSP及各个海水环境因素和气象因素没有显著的相关关系,表明这些指数所代表的气候现象或大气环流特征,在该研究的范围内和条件下,对HSP及所研究的海水环境因素和气象因素没有直接的、明显的影响。气候和气象对海水环境的影响往往是间接的,表现为生态系统内部的复杂相互作用,累积压力并损害海洋生态系统的弹性^[52]。这也提示在研究HSP和海水环境、气象因素的关

系时,可以暂时不考虑ONI、MEI、AOI的直接作用。

3.3 非相关性因素的超前滞后分析

为了充分探究HSP与各因素的相关性,除皮尔逊相关性分析之外,考虑各因素对HSP可能存在的滞后影响,进一步分析它们时间序列之间的超前滞后关系,并得到交叉滞后图(图 11)。其中横轴Lag是滞后阶数,表示两个时间序列之间的时间偏移量,在本研究中时间单位为年, Lag=0时,直接计算两个

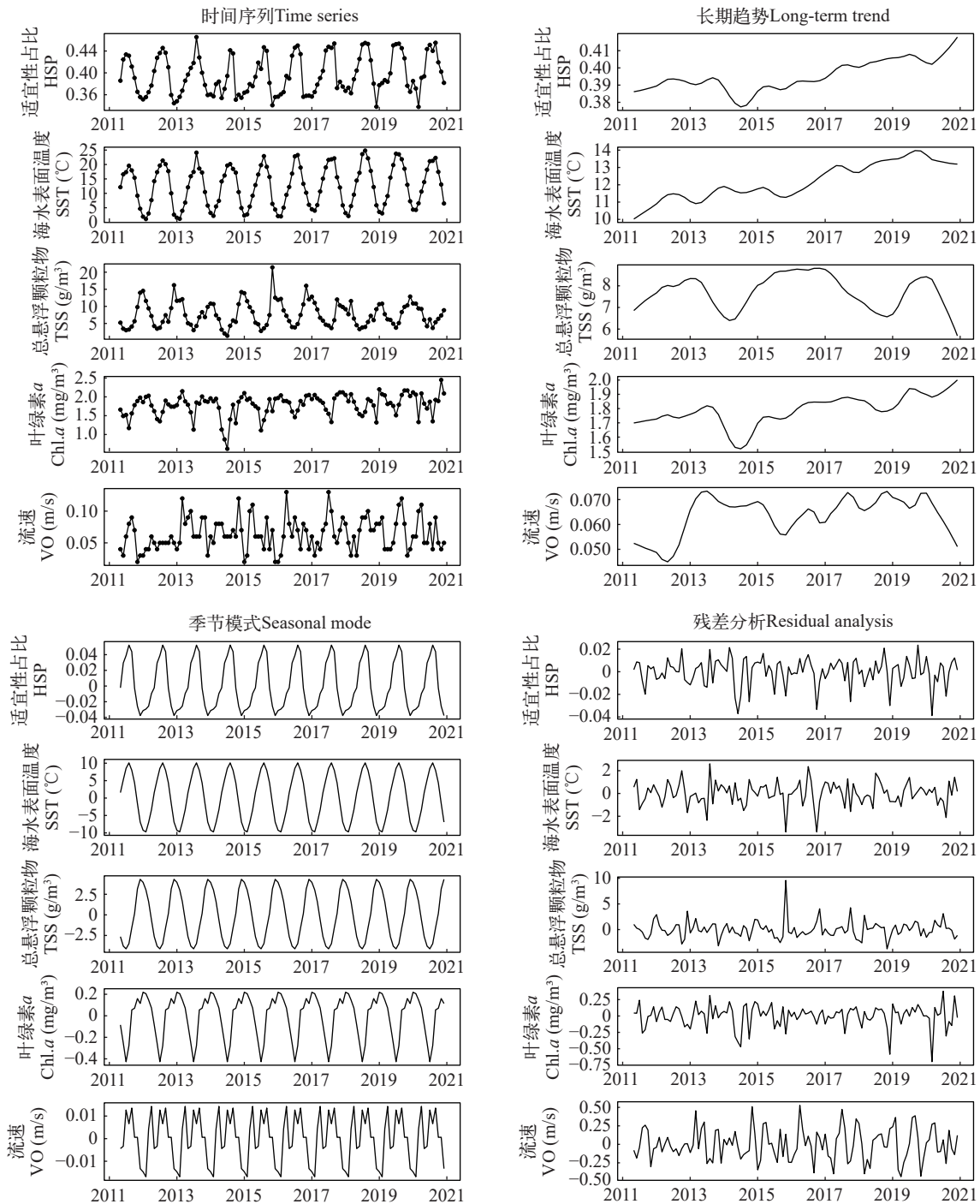


图9 HSP及SST、TSS、VO的时间序列、长期趋势、季节模式及残差分析

Fig. 9 Time series, long-term trend, seasonal mode, and residual analysis of HSP, SST, TSS, and VO

时间序列在同一时间点上的相关性, 当Lag为正值时, 表示HSP领先于其他变量, 当其负值时, 表示HSP滞后于其他变量; 纵轴CCF (Cross-Correlation Function)是交叉相关系数, 取值范围是 $[-1, 1]$, 当交叉相关系数大于0时, 表示两个时间序列在该滞后阶数下呈正相关关系, 即一个序列的增加伴随着另一个序列的增加, 当其小于0时, 说明两个时间序列在该滞后阶数下呈负相关关系, 当其接近0时, 表明两个时间序列在该滞后阶数下几乎不存在线性相关关系。

如图 11 显示, HSP相比于SST, 在同期呈现强正相关, 表明水温升高直接提升栖息地适宜性, SST提前一年的变化仍对HSP有正向影响, 但弱于同期, 超过一年后, HSP对未来SST的关联性不显著; HSP与TSS在同期强负相关, 悬浮物浓度升高显著抑制栖息地质量, 一年间隔下TSS对未来HSP的负面影响持续但减弱。

此外, 在相关性分析中没有呈现相关性的其他因素, 例如HSP与Chl.a的相关性与TSS的相关性模式相似, 在同期呈现中等负相关关系; Sal和Tas与HSP在同期无相关关系, 但在一年的滞后期中呈现波动的正负相关性关系, 先呈现弱负相关, 后呈现弱正相关; WS与HSP在任何时期都无相关性关系; Pr与HSP存在弱相关关系, 与SST的模式相似; 此外, HSP与气候指数ONI、MEI和AOI均不存在直接相

关性和超前滞后相关关系。

3.4 基于适宜性的牡蛎礁生态学分析

探明影响牡蛎礁构筑的主要因素及其作用机制, 为后续分析牡蛎礁在海洋环境中的生态功能和效益提供了科学依据。陆地栖息地的破碎化主要由人为破坏导致, 不仅造成生物多样性的减少, 还使得依赖这些栖息地的生物陷入孤立和流离失所的境地^[53]。在水生环境中, 栖息地破碎化则可能由多种因素引起, 包括栖息地退化、物理屏障消失及生理压力条件变化等, 这些因素共同抑制了生物的迁移和扩散, 导致常驻种群退化甚至消失^[54]。

基于2011—2020年夏季平均适宜性结果, 我们提取了适宜性指数为0.7—1的区域, 对筛选出的高适宜区域进行连通区域的识别, 以像素数量来代表面积, 计算每个连通区域的面积, 选取像素数量大于300的区域提取为核心生境, 最终得到5个核心生境。如图 12 所示, 长牡蛎礁核心生境在山东近岸区域呈现较为均匀的斑块状分布, 这些区域具备牡蛎礁重建修复和生长的关键环境条件, 是进行长牡蛎礁修复的适宜场所, 可以在核心生境展开优先修复的策略。

生态走廊是各海洋保护区之间的关键纽带^[55]。最低成本路径(LCP)分析基于GIS, 通过计算栅格网格中映射区域在成本表面的最小累积阻力, 识别出最优路径^[56]。LCP分析已被用于评估破碎栖息地

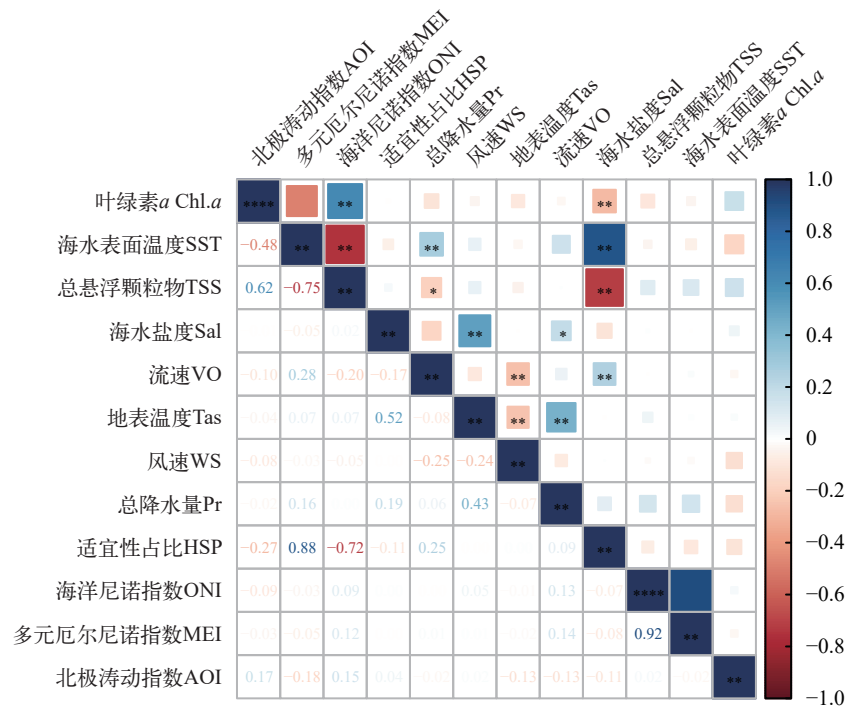


图 10 2011—2020年山东近海20 km海水环境因子与适宜性占比及气象气候因素时间序列的相关性分析

Fig. 10 Correlation analysis of environmental factors, suitability ratio and time series of meteorological and climatic factors in 20 km offshore waters of Shandong from 2011 to 2020

中生物体穿越生态走廊的能力^[57]。该模型根据最简单的行进路线、阻碍运动的最少障碍及连接最多的理想栖息地以评估栖息地斑块之间的连通性^[58]。LCP模型通常应用于大型迁徙陆生哺乳动物,但在经历栖息地破碎化的水生环境中相对未得到充分利用^[59]。为了使LCP模型在水生环境中有效,成本网格必须纳入相关的非生物和生物因素^[60]。在本研究中,特定标准的成本网格是以整合了多因素的HSI栅格数据作为物种移动的成本,将筛选后的核

心生境栅格转换为多边形矢量数据,然后计算每个核心生境区域的质心坐标,并计算每对质心之间的最小成本路径^[44]。

密集分布的核心栖息地可以为物种提供更有效的移动路径,多个核心生境的分布,极大缩短了最低成本路径,为牡蛎礁生境的连通创造了适宜环境条件。允许牡蛎幼体和浮游幼虫在不同种群间扩散,促进基因交流,避免近亲繁殖导致的遗传多样性丧失,同时提高了灾害抵御能力。当局部生境

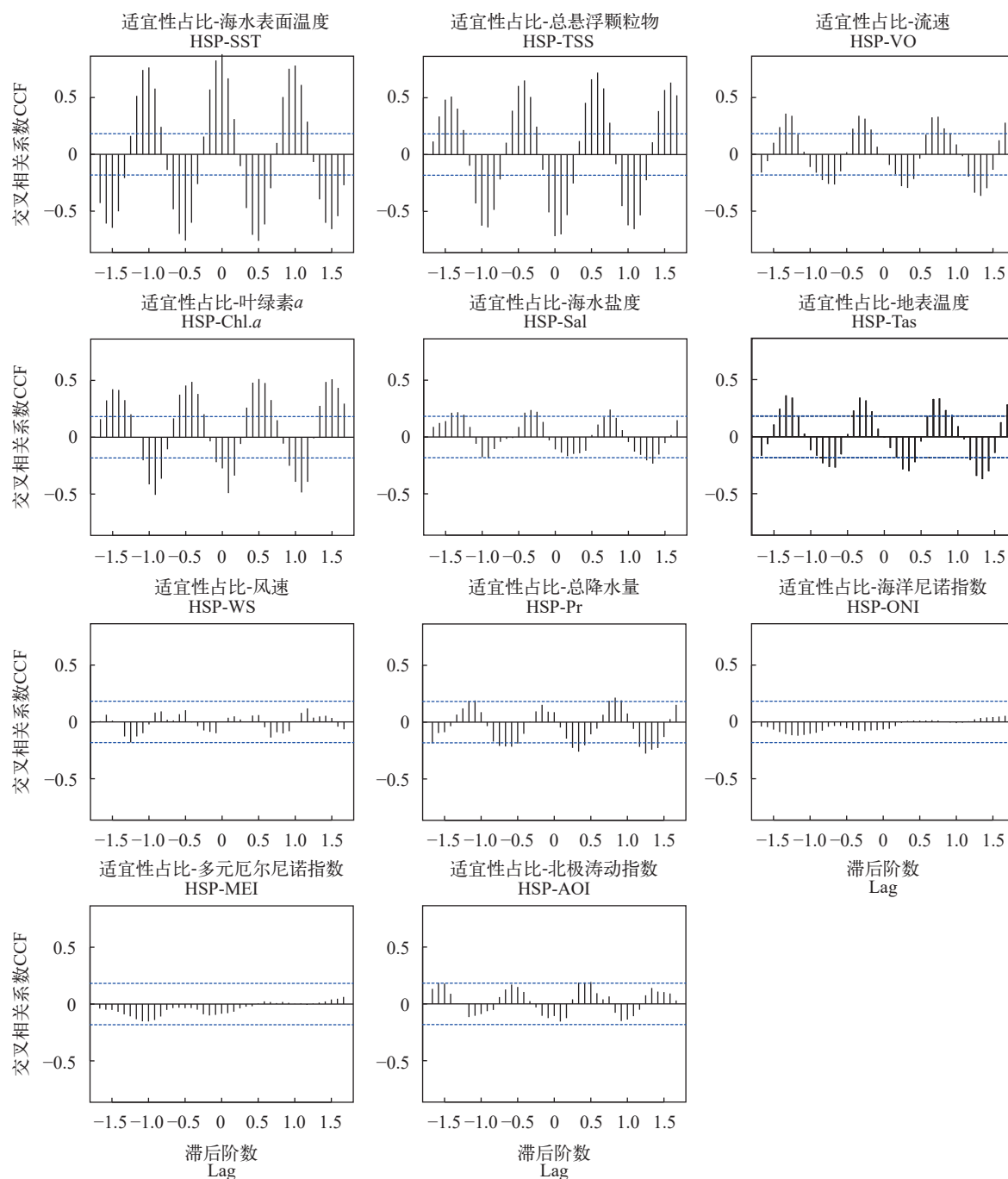


图 11 HSP与各因素的超前滞后分析

Fig. 11 Lead and lag analysis of HSP and various factors

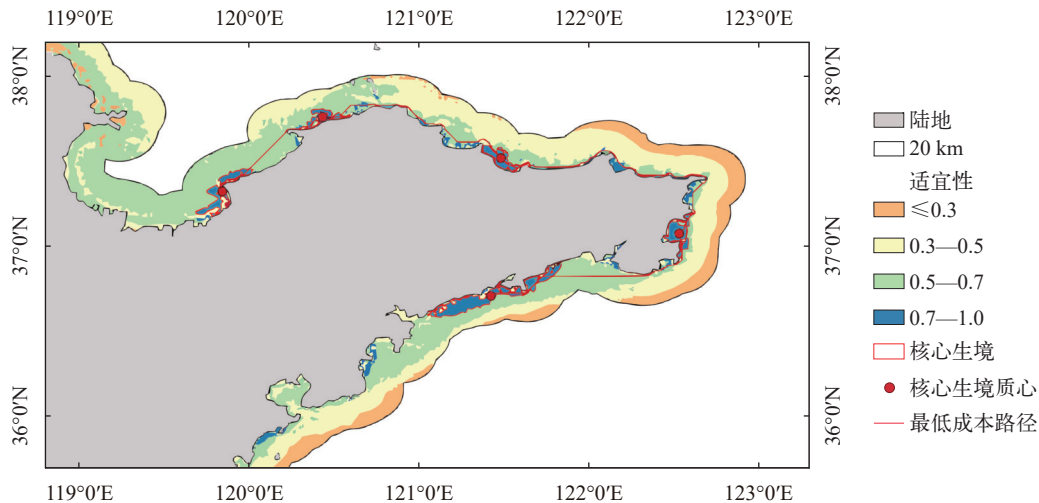


图 12 基于2011—2020年夏季平均适宜性的长牡蛎礁核心生境及最低成本路径分析

Fig. 12 Core habitat and the lowest cost path analysis of *Crassostrea gigas* reef based on average summer suitability from 2011 to 2020

受污染或气候灾害破坏时,物种可通过最低成本路径向其他区域迁移,提升生态系统韧性^[61]。尽管本研究的结果表明山东近海有满足最低成本路径的适宜环境条件,但仍存在局限性。由于长牡蛎等定居型物种的幼虫有随水体漂流的被动扩散机制,需要进一步结合海洋物理扩散模型模拟幼虫的扩散,并考虑诸如核心生境大小、种群规模等因素的影响,获得更为精确的扩散路径^[62],结合适宜性结果探究其是否能够越过山东东部沿海等低适宜性区域,并可将其纳入牡蛎礁适宜性修复选址^[43]。

本研究旨在为长牡蛎礁的保护规划提供科学依据,其分析框架与方法论对不同物种元种群在多种空间尺度上的保护规划亦具有普适性参考价值,并可为政府机构及非政府组织日益增多的多物种、连通性导向型保护项目提供决策支持与参考^[55]。

4 结论

(1)山东近海长牡蛎礁适宜性整体呈现“近岸高、远海低”的空间格局。高适宜区占研究区域总面积的3%,主要分布于莱州湾东南沿岸、烟台北部近岸、荣成桑沟湾及乳山南部海域。适宜性分布的季度变化呈现“冬缩夏扩”的演变规律,夏季适宜性显著高于冬季。(2)时间序列分析表明,适宜性在2011—2020年呈上升趋势。皮尔逊相关性分析显示,HSP与SST呈极显著正相关,与TSS呈显著负相关,适宜性受SST的季节性波动和TSS的季节性差异驱动;Chl.a、Sal、Tas存在不同程度的滞后相关关系。(3)基于夏季适宜性分布提取的5处潜在核心生境在山东近海呈现较为均匀的斑块状分布,最低成本路径分析表明,核心生境可在近海形成较高的生态连通性,可为牡蛎幼体扩散通道提供适宜环

境条件,促进基因交流与种群恢复。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Technical Guideline for Investigation and Assessment of Current Status of Coastal Ecosystem [S]. Beijing, 2020: 1-4. [中华人民共和国自然资源部. 海岸带生态系统现状调查与评估技术导则 [S]. 北京, 2020: 1-4.]
- [2] Cubillo A M, Lopes A S, Ferreira J G, *et al.* Quantification and valuation of the potential of shellfish ecosystem services in mitigating coastal eutrophication [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2023(293): 108469.
- [3] Filippini G, Bugnot A B, Varkey D R, *et al.* Nitrogen-cycling genes in oyster reefs and surrounding sediments: Relationships with environmental factors and respective nitrogen rates [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023(197): 115710.
- [4] Balboa W, McDonald D, Olsen Z, *et al.* Oyster reefs as habitat for aquatic macrofauna in a Gulf of Mexico estuary: biotic complexity at spatial, ecological, and demographic scales [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2024(746): 49-66.
- [5] Stanley R E, Bilskie M V, Woodson C B, *et al.* A model for understanding the effects of flow conditions on oyster reef development and impacts to wave attenuation [J]. *Ecological Modelling*, 2024(489): 110627.
- [6] Beck M W, Brumbaugh R, Airoldi L, *et al.* Shellfish Reefs at Risk: A Global Analysis of Problems and Solutions [R]. Nature Conservancy, 2009: 1-52.
- [7] Han Y S. Oyster reefs and the ancient coastline of Xinhé River [J]. *Studia Marina Sinica*, 1980(16): 59-65. [韩有松. 牡蛎礁与新河古海岸线 [J]. 海洋科学集刊, 1980(16): 59-65.]
- [8] Jiang L, Yu J. Research status and hot spot analysis of oyster reef based on bibliometrics [J]. *Acta Ecologica*

- Sinica*, 2021, **41**(18): 7484-7491. [姜璐, 余静. 基于文献计量的牡蛎礁研究现状与热点分析 [J]. 生态学报, 2021, **41**(18): 7484-7491.]
- [9] Smith R S, Lusk B, Castorani M C N. Restored oyster reefs match multiple functions of natural reefs within a decade [J]. *Conservation Letters*, 2022, **15**(4): e12883.
- [10] Smith R S, Pruett J L. Oyster restoration to recover ecosystem services [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2025, **17**(1): 83-113.
- [11] Fitzsimons J A, Branigan S, Gillies C L, *et al.* Restoring shellfish reefs: Global guidelines for practitioners and scientists [J]. *Conservation Science and Practice*, 2020, **2**(6): e198.
- [12] The Nature Conservancy (China). Conservation and Restoration Report on Chinese Oyster Reef Habitats [R]. Beijing: The Nature Conservancy, 2022: 1-80. [大自然保护协会(TNC)中国项目. 中国牡蛎礁栖息地保护与修复研究报告 [R]. 北京: 大自然保护协会(TNC), 2022: 1-80.]
- [13] Bergsma E, Artigues S, Almar R, *et al.* Satellite Optical Imagery: Towards Fully Integrated Measurements of the Coastal Zone [C]. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2024: 12667.
- [14] Mahjoobi E, Rafiei F. Exploring the Potential of Geospatial Data: an In-depth Investigation [M]. Exploring Remote Sensing: Methods and Applications. London: IntechOpen, 2024.
- [15] Bulut E, Duru O. Analytic Hierarchy Process (AHP) in Maritime Logistics: Theory, Application and Fuzzy Set Integration [M]. Multi-Criteria Decision Making in Maritime Studies and Logistics. Cham: Springer International Publishing, 2017: 31-78.
- [16] Güngör M, Bekmezci S, Doğan N. The effect of sample weighting on hierarchical linear modeling in the large-scale assessment data [J]. *Erzincan Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 2024, **26**(3): 400-413.
- [17] Loumi K, Redjem A. Combining AHP with GIS for mapping the vulnerability to forest fire risk [J]. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, 2024(2): 187879.
- [18] Shi X F. Atlas of the Offshore Marine Areas of China: Marine Substrate [M]. Beijing: Ocean Press, 2017: 1-349. [石学法. 中国近海海洋图集: 海洋底质 [M]. 北京: 海洋出版社, 2017: 1-349.]
- [19] Zhang X, Lou Z K. A study of Chinese oysters [J]. *Acta Zoologica Sinica*, 1956, **2**(1): 65-94, 138-146. [张玺, 楼子康. 中国牡蛎的研究 [J]. 动物学报, 1956, **2**(1): 65-94, 138-146.]
- [20] Li J F, Shang Z W, Chen Y S, *et al.* Research status and protection suggestions on oyster reef in Bohai Bay [J]. *Geological Survey and Research*, 2020, **43**(4): 317-333. [李建芬, 商志文, 陈永胜, 等. 渤海湾牡蛎礁的研究现状与保护建议 [J]. 地质调查与研究, 2020, **43**(4): 317-333.]
- [21] Zuo T, Zhang B Y, Wang J, *et al.* Population structure of oysters in the natural oyster reef near the mouth of the Xiaodaohe River, southwest of the Yellow River Estuary [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(7): 3086-3097.
- [22] Geng X S, Fu M Z, Xu X S, *et al.* Modern oyster reef development and ecological characteristics, and paleoenvironmental significance [J]. *Science in China, (Series B)*, 1991(8): 867-875. [耿秀山, 傅命佐, 徐孝诗, 等. 现代牡蛎礁发育与生态特征及古环境意义 [J]. 中国科学(B辑), 1991(8): 867-875.]
- [23] Liu L L. Research on the Status of Oyster Reef and Resource Restoration in Kenli, Dongying [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2019: 15-30. [刘鲁雷. 东营垦利近江牡蛎礁现状调查与资源修复研究 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2019: 15-30.]
- [24] Alder A, Hillman J R. Where the wild things aren't: exploring the utility of rapid, small-scale translocations to improve site selection for shellfish restoration [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024(11): 1354257.
- [25] Cugier P, Thomas Y, Bacher C. Ecosystem modelling to assess the impact of rearing density, environment variability and mortality on oyster production [J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2022(14): 53-70.
- [26] Bordignon F, Zomeño C, Xiccato G, *et al.* Effect of emersion time on growth, mortality and quality of Pacific oysters (*Crassostrea gigas*, Thunberg 1973) reared in a suspended system in a lagoon in Northern Italy [J]. *Aquaculture*, 2020(528): 735481.
- [27] Rahman M S, Rahman M S. Elevated seasonal temperature disrupts prooxidant-antioxidant homeostasis and promotes cellular apoptosis in the American oyster, *Crassostrea virginica*, in the Gulf of Mexico: a field study [J]. *Cell Stress and Chaperones*, 2021, **26**(6): 917-936.
- [28] Santerre C, Sourdain P, Marc N, *et al.* Oyster sex determination is influenced by temperature-first clues in spat during first gonadic differentiation and gametogenesis [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2013, **165**(1): 61-69.
- [29] Sillanpää J K, Cardoso J C d R, Félix R C, *et al.* Dilution of seawater affects the Ca^{2+} transport in the outer mantle epithelium of *Crassostrea gigas* [J]. *Frontiers in Physiology*, 2020(11): 1.
- [30] Ashton E C, Guist S, Roberts D, *et al.* Effects of environmental factors and husbandry practices on summer mortality events in the cultivated Pacific oyster *Crassostrea gigas* in the North of Ireland [J]. *Journal of Shellfish Research*, 2020, **39**(1): 13.
- [31] Byers J E, Grabowski J H, Piehler M F, *et al.* Geographic variation in intertidal oyster reef properties and the influence of tidal prism [J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, **60**(3): 1051-1063.
- [32] Ridge J T, Rodriguez A B, Joel Fodrie F, *et al.* Maximizing oyster-reef growth supports green infrastructure with

- accelerating sea-level rise [J]. *Scientific Reports*, 2015(5): 14785.
- [33] Howie A H, Reeves S E, Gillies C L, *et al.* Integration of social data into restoration suitability modelling for oyster reefs [J]. *Ecological Indicators*, 2024(158): 111531.
- [34] Herbert D, Astrom E, Berszoza A C, *et al.* Mitigating erosional effects induced by boat wakes with living shorelines [J]. *Sustainability*, 2018, **10**(2): 436.
- [35] Able K W, Grothues T M, Kemp I M. Fine-scale distribution of pelagic fishes relative to a large urban pier [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2013(476): 185-198.
- [36] Beseres Pollack J, Palmer T A, Williams A E. Medium-term monitoring reveals effects of El Niño Southern Oscillation climate variability on local salinity and faunal dynamics on a restored oyster reef [J]. *PLoS One*, 2021, **16**(8): e0255931.
- [37] Theuerkauf S J, Eggleston D B, Puckett B J, *et al.* Wave exposure structures oyster distribution on natural intertidal reefs, but not on hardened shorelines [J]. *Estuaries and Coasts*, 2017(40): 376-386.
- [38] Ni Z H, Song Z Y, Wu L C. An approach to separating the current velocity in estuarine and coastal waters [J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*, 2009, **21**(4): 512-519.
- [39] Gong P, Chen B, Li X, *et al.* Mapping essential urban land use categories in China (EULUC-China): Preliminary results for 2018 [J]. *Science Bulletin*, 2020, **65**(3): 182-187.
- [40] Wang X, Zhang J, Zhong Y, *et al.* GIS-based spatial suitability assessment for pacific oyster *Crassostrea gigas* reef restoration: a case study of Laizhou Bay, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023(186): 114416.
- [41] Saaty T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures [J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 1977, **15**(3): 234-281.
- [42] Theuerkauf S J, Lipcius R N. Quantitative validation of a habitat suitability index for oyster restoration [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2016(3): 64.
- [43] Theuerkauf S J, Eggleston D B, Puckett B J. Integrating ecosystem services considerations within a GIS-based habitat suitability index for oyster restoration [J]. *PLoS One*, 2019, **14**(1): e0210936.
- [44] Seegmiller L, Shirabe T. A method for finding a least-cost corridor on an ordinal-scaled raster cost surface [J]. *Annals of GIS*, 2023, **29**(2): 205-225.
- [45] Dong Y W, Bao M H, Cheng J, *et al.* Advances of marine biogeography in China: Species distribution model and its applications [J]. *Biodiversity Science*, 2024, **32**(5): 142-172. [董云伟, 鲍梦幻, 程娇, 等. 中国海洋生物地理学研究进展和热点: 物种分布模型及其应用 [J]. 生物多样性, 2024, **32**(5): 142-172.]
- [46] Terauchi G, Tsujimoto R, Ishizaka J, *et al.* Preliminary assessment of eutrophication by remotely sensed chlorophyll-a in Toyama Bay, the Sea of Japan [J]. *Journal of Oceanography*, 2014, **70**(2): 175-184.
- [47] Malouf R E, Breese W P. Seasonal changes in the effects of temperature and water flow rate on the growth of juvenile Pacific oysters, *Crassostrea gigas* (Thunberg) [J]. *Aquaculture*, 1977, **12**(1): 1-13.
- [48] O'Connor W A, Lawler N F. Salinity and temperature tolerance of embryos and juveniles of the pearl oyster, *Pinctada imbricata* Röding [J]. *Aquaculture*, 2004, **229**(1/2/3/4): 493-506.
- [49] Yin Z X, Liu Y, Li C L, *et al.* Marine aquaculture spatial planning on market orientation for Pacific oyster in Shandong, China [J]. *Aquaculture*, 2024(591): 741144.
- [50] Yang P, Li J F, Wang F, *et al.* Present situation and protection restoration suggestions on the natural oyster reefs in China [J]. *Geology in China*, 2023, **50**(4): 1082-1092. [杨朋, 李建芬, 王福, 等. 我国天然牡蛎礁现状及保护修复建议 [J]. 中国地质, 2023, **50**(4): 1082-1092.]
- [51] Song J, Yao L, Guo J, *et al.* The seasonal correlation between El Niño and Southern Oscillation events and sea surface temperature anomalies in the South China Sea from 1958 to 2024 [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, **13**(1): 153.
- [52] Trégarot E, D'Olivo J P, Botelho A Z, *et al.* Effects of climate change on marine coastal ecosystems—A review to guide research and management [J]. *Biological Conservation*, 2024(289): 110394.
- [53] Cushman S A. Effects of habitat loss and fragmentation on amphibians: a review and prospectus [J]. *Biological Conservation*, 2006, **128**(2): 231-240.
- [54] Eby L A, Crowder L B. Hypoxia-based habitat compression in the Neuse River Estuary: context-dependent shifts in behavioral avoidance thresholds [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2002, **59**(6): 952-965.
- [55] Podda C, Porporato E M D. Marine spatial planning for connectivity and conservation through ecological corridors between marine protected areas and other effective area-based conservation measures [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023(10): 1271397.
- [56] Gonçalves A B. An extension of GIS-based least-cost path modelling to the location of wide paths [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, **24**(7): 983-996.
- [57] Ray N, Lehmann A, Joly P. Modeling spatial distribution of amphibian populations: a GIS approach based on habitat matrix permeability [J]. *Biodiversity & Conservation*, 2002, **11**(12): 2143-2165.
- [58] Larkin J L, Maehr D S, Hootor T S, *et al.* Landscape linkages and conservation planning for the black bear in west-central Florida [J]. *Animal Conservation*, 2004, **7**(1): 23-34.
- [59] Micheli F, Peterson C H. Estuarine vegetated habitats as corridors for predator movements [J]. *Conservation Biology*, 1999, **13**(4): 869-881.

- [60] Hanke M H, Lambert J D, Smith K J. Utilization of a multicriteria least cost path model in an aquatic environment [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014, **28**(8): 1642-1657.
- [61] Bode M, Stewart O, Choukroun S M. Incorporating biophysical larval dispersal simulations into coral reef conservation decision-making [M]. *Oceanographic Processes of Coral Reefs*. Boca Raton: CRC Press, 2024: 272-281.
- [62] Wang W, Wang J, Choi F M P, *et al.* Global warming and artificial shorelines reshape seashore biogeography [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, **29**(2): 220-231.

SUITABILITY ASSESSMENT FOR *CRASSOSTREA GIGAS* REEF RESTORATION IN SHANDONG COASTAL WATERS BASED ON REMOTE SENSING AND GIS

SI Zhang-Qi¹, LI Chun-Lin¹, YIN Zi-Xu¹, XIANG Le² and LIU Yang^{1,3}

(1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Qingdao Environmental Sanitation Development Center, Qingdao 266003, China; 3. Joint Laboratory for Marine Fisheries Satellite Applications Research, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: Influenced by overfishing, habitat destruction, and climate change, global oyster reef degradation has become severe, with artificial restoration emerging as one of the most effective measures. In this study, the coastal waters of Shandong Peninsula were selected as the study area. Based on relevant literature, determine the marine environmental, habitat, and socio-economic factors that have significant influences on the growth of *Crassostrea gigas* and the restoration of oyster reef, while delineating threshold ranges and optimal conditions of related factors. Integrating multi-source data—including satellite remote sensing data (2011—2020), bathymetric data, and socioeconomic data—and using Geographic Information System (GIS), Analytic Hierarchy Process (AHP), and R for spatial overlay analysis and spatiotemporal statistics, a comprehensive suitability evaluation index system for *Crassostrea gigas* reef restoration along the Shandong coast was developed. This study also investigated the spatiotemporal distribution patterns of suitability and the environmental mechanisms influencing it. The results showed that the suitability of *Crassostrea gigas* reefs in the coastal waters of Shandong is dominated by medium and low suitability zones overall. High suitability zones are primarily distributed in the southeastern Laizhou Bay, the northern coastal area of Yantai, the Sanggou Bay in Rongcheng, and the southern coastal area of Rushan. The suitability exhibits distinct seasonal characteristics, showing an evolution pattern of “contraction in winter and expansion in summer”. The proportion of area with a suitability index greater than 0.5 showed an overall upward trend, with significant quarterly variations. It exhibited the strongest correlation with Sea Surface Temperature (SST), increasing significantly with rising SST, and a negative correlation with Total Suspended Sediment (TSS). The ecological benefit analysis of the *Crassostrea gigas* reef based on suitability indicated five potential core habitats in the study area during summer, presenting a relatively uniform patchy distribution. These findings provide a theoretical basis for scientific site selection of *Crassostrea gigas* reef ecological restoration in the coastal waters of Shandong.

Key words: Oyster reef restoration; Suitable location selection; *Crassostrea gigas*; Geographic Information System