



基于遥感和 DEB 模型的山东半岛长牡蛎秋冬季育肥养殖适宜区域评价

尹子旭¹, 王鹏浩¹, 刘阳^{1*}, 李春霖¹, 张志新², 李琪¹

(1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;

2. 威海市水产学校, 山东 威海 264300)

摘要: 为了优化山东半岛近海长牡蛎秋冬季育肥养殖的空间格局, 本研究采用卫星遥感获取的海水表层温度、叶绿素 *a* 浓度和悬浮颗粒物浓度数据, 以及海水表面高度再分析数据, 基于动态能量收支 (Dynamic Energy Budget, DEB) 理论, 构建了山东半岛长牡蛎秋冬季育肥养殖适宜性评价模型, 通过对山东半岛海域长牡蛎养殖适宜性指数的时空变动分析发现, 适宜性呈现南部海域>北部海域>东部海域>西部海域的趋势, 其中南部海域非常适宜的区域面积占比最大, 为 9.1%, 主要分布在乳山地区; 山东半岛西部黄河口周边海域存在大面积的不适宜养殖区域, 占比高达该海域的 30.5%。长牡蛎秋冬季育肥养殖的非常适宜区域在 2017 年和 2019 年分别占总近海面积的 38.2% 和 57.9%, 显著高于其余年份。通过实地验证发现, 山东长牡蛎的秋冬季育肥养殖最适宜海区具备水体浑浊度较低、叶绿素浓度较高、温度较暖且风浪较小的特征。本研究结果可以为山东半岛长牡蛎养殖规划提供有效的量化依据和理论基础。

关键词: 长牡蛎; 卫星遥感; 动态能量收支; 养殖适宜性指数; 养殖区划管理

中图分类号: S 954.3

文献标志码: A

结合高新技术发展蓝色粮仓的理念, 实现新旧动能转化和产业升级转型, 推动水产养殖业绿色发展是我国未来水产行业的主要发展方向^[1]。2023 年, 中国的水产贝类养殖产量占总海产品养殖产量的 68.7%, 是第一大海水养殖产品; 其中, 牡蛎是中国第一大养殖贝类, 养殖产量占中国海水贝类养殖总产量的 40.5%^[2]。长牡蛎 (*Crassostrea gigas*) 又称太平洋牡蛎, 原产于东亚地区, 是世界上养殖范围最广、产量最高的经济贝类。20 世纪 80 年代初, 长牡蛎由日本引入中国, 并于 80 年代末开始在我国北方沿海大面积进行筏式养殖^[3]。目前我国长牡蛎产地主要集中在山东、辽

宁、浙江、福建、广东等沿海地区, 年产量高达 500 万 t^[2], 取得了显著的经济效益和社会效益。

我国传统的近海牡蛎筏式养殖一般采用春种秋收的模式。每年春季至夏季, 将挂满牡蛎苗的养殖筏投入海中, 并于次年秋季进行牡蛎的收取^[3]。山东乳山海域夏季风浪较大, 而水体的搅动会促进牡蛎的排卵行为, 春种秋收的牡蛎养殖模式屡屡受挫。21 世纪初, 乳山海域开始采用长牡蛎的秋冬育肥养殖技术, 将肥满度和出肉率较低的 1~2 龄牡蛎, 秋季伊始投入海中, 在笼中进行牡蛎的育肥养殖, 当年冬季至来年春季进行收获^[4], 可以避免高温引起的高发病率、养殖筏

收稿日期: 2022-02-11 修回日期: 2023-01-03

资助项目: 国家自然科学基金 (41976210)

第一作者: 尹子旭 (作者), 从事渔业遥感研究, E-mail: yinzixu03@stu.ouc.edu.cn;

王鹏浩, 从事渔业遥感研究, E-mail: wph@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 刘阳, 从事渔业遥感研究, E-mail: yangliu315@ouc.edu.cn



附着物过多等问题, 还能显著提高牡蛎的肥满度和重量^[5]。目前的牡蛎秋冬育肥养殖方法主要应用于山东乳山海域, 但是由于不同海域的情况差异较大, 育肥养殖技术尚未得到广泛推广和应用。

动态能量收支模型 (Dynamic Energy Budget, DEB) 是基于能量守恒定律建立的生态生理学模型, 可以根据水温和食物等环境变量的变化预测生物的生长情况^[6]。DEB 模型整合了一个物种的生态生理学参数, 可以模拟其在不同环境条件下的生长发育繁殖过程中的能量分配。2006 年, Pouvreau 等^[7]首次通过实验, 测定了长牡蛎的生长方程, 创立了长牡蛎的 DEB 模型。Bourlès 等^[8]对 Pouvreau 等^[7]建立的模型进行改进, 完善了模型中牡蛎的繁殖过程, 并将模型应用于围海池塘养殖。我国对贝类 DEB 模型的研究起步较晚。张继红等^[9]测定了虾夷扇贝 (*Patinopecten yessoensis*) DEB 模型的 5 个关键参数, 为中国贝类 DEB 模型参数的准确获取提供了参考方法。张继红等^[10]根据近海养殖和室内实验数据, 建立了可应用于中国北方近海的虾夷扇贝 DEB 模型, 并通过模型预测出长海筏式养殖的虾夷扇贝养殖密度已经超出了海域的养殖容量等问题。Jiang 等^[11]应用了张继红等^[10]建立的虾夷扇贝 DEB 模型, 模拟了大连獐子岛海域海水养殖虾夷扇贝的生长和繁殖, 提出了未来模型需要完善食物摄食方向。之后有学者陆续研究分析了我国近海的菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinarum*)、文蛤 (*Meretrix meretrix*) 和缢蛏 (*Sinonovacula constricta*) 等 DEB 模型^[12-14], 但目前应用 DEB 模型在牡蛎生长方面的研究鲜有报道。

卫星遥感和地理信息系统 (Geographical information systems, GIS) 等技术为水产养殖适宜性研究提供了高效的手段和广阔的应用前景, 刘阳^[15]通过对海洋表面的环境数据进行分析建模, 为贝藻类养殖适宜区域进行了选址研究。林勇等^[16]通过遥感和 GIS 建模, 对北黄海大小长山岛进行了虾夷扇贝的养殖适宜性综合评价, 分析出大长山岛西南和西北部海域养殖适宜性明显高于其他地区。Liu 等^[17]通过遥感和 GIS 技术, 构建了日本喷火湾和山东近海的虾夷扇贝最适养殖选址模型, 探究了东亚季风和厄尔尼诺等极端气候事件对扇贝养殖的影响。结合卫星遥感技术的便利性和 DEB 模型分析生物生长发育繁殖的精确性, 可以更加精准高效地分析养殖适宜性区的时空分布^[18]。Palmer 等^[19]结合长牡蛎的 DEB 模型和卫星

遥感获取的海洋环境数据, 构建了法国布赫涅夫湾近海长牡蛎养殖适宜性评价体系, 发现了海湾的东北部比西南部更适合牡蛎养殖, 推断了法国近海牡蛎养殖的增长潜力。我国 DEB 模型尚未发展成熟, 且利用遥感数据和 GIS 方法对养殖适宜性的研究起步较晚, 相关研究至今鲜有报道。

本研究为了建立中国山东近海长牡蛎 DEB 模型, 结合养殖长牡蛎的实测生长数据与卫星遥感等获得的海洋环境数据, 构建一套长牡蛎秋冬季育肥养殖适宜性评价体系, 分析山东近岸长牡蛎养殖适宜性的时空变动和年际差异并探讨影响变动机理, 为山东长牡蛎增养殖业的规划与发展提供理论指导。

1 材料与方 法

1.1 研究区域

山东半岛位于华北平原东部, 是中国最大的半岛, 伸入渤海、黄海间, 属暖温带湿润季风气候。山东陆地面积为 7.3 万 km², 海域面积 15.8 万 km²; 其中, 水深 10 m 以内的近海区域面积约为 1.1 万 km², 对近海养殖十分有利^[20]。山东半岛水系丰富, 大量的河水流入海洋, 可为近海养殖提供丰富的养料。黄河为中国第二长河, 入海口位于山东东营, 莱州湾西北部, 年径流量 300 亿 m³, 水流湍急且携带大量泥沙^[21]。

本研究所选取的海域范围为 35.7°~38.2°N, 118.8°~123.3°E。按市级行政区划, 将研究海域划分为 4 个区域进行养殖适宜性的对比分析, 分别为西部海域 (潍坊市海域和东营市部分海域)、北部海域 (烟台市北部海域)、东部海域 (威海市海域) 和南部海域 (烟台市南部海域和青岛市部分海域) (图 1)。

1.2 遥感数据预处理

本研究采用了 2011—2020 年的海水表层温度 (sea surface temperature, SST)、叶绿素 *a* 浓度 (chlorophyll *a*, Chl.*a*) 和悬浮颗粒物浓度 (total suspended sediment, TSS) 作为影响牡蛎育肥养殖 DEB 模型的环境数据。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)。本研究采用 L2 级数据, 初始分辨率为 1 km。原始数据使用 SeaDAS 8.0 软件的 OCSSW 工具进行大气校正, 通过栅格计算

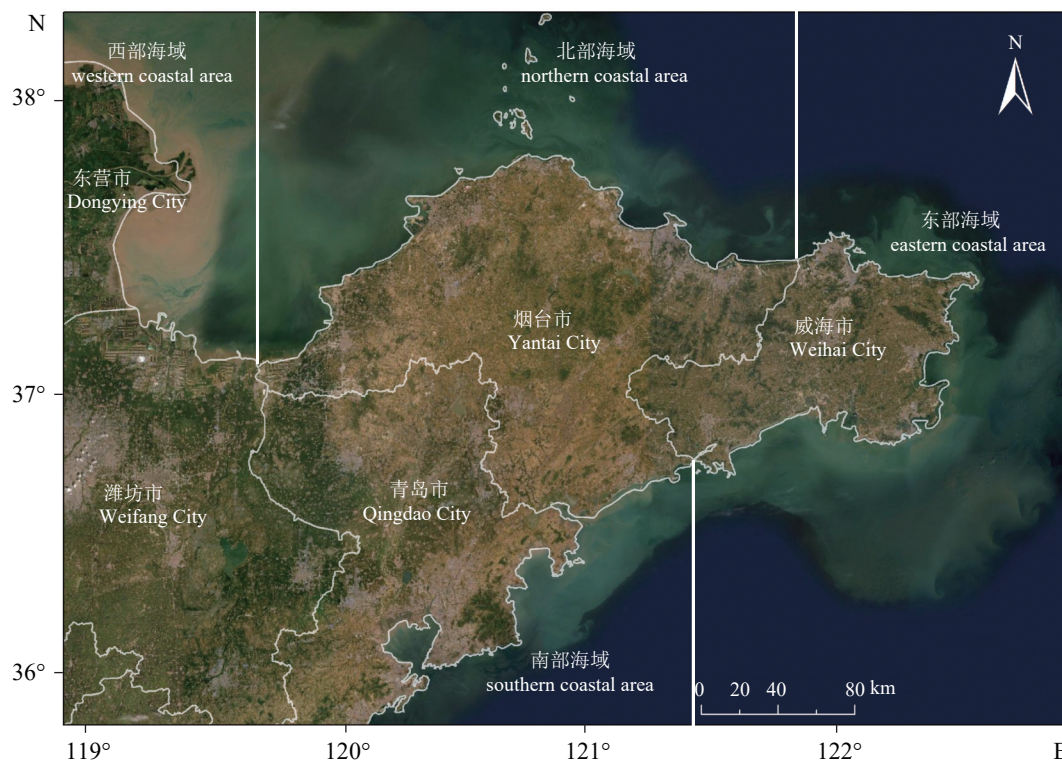


图 1 长牡蛎育苗肥养殖研究区及海域划分

Fig. 1 Study area and regional divisions of *C. gigas*

得到月平均结果, 使用 ArcGIS 10.7 软件将遥感数据重采样到空间 500 m 分辨率, 得到山东半岛近海月平均 SST 数据。

Chl.*a* 和 TSS 数据来源于韩国发射的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)。本研究采用 L1 级数据, 初始分辨率为 500 m。原始数据使用 GDPS 2.0 的 Batch Process 工具, 分别通过 Yoc^[22] 和 OC2^[23] 算法进行 Chl.*a* 和 TSS 的波段计算, 而后进行大气校正并计算月平均结果。随后使用 ENVI 5.3 软件, 使用官方提供的 GLT 文件进行影像的几何校正, 得到山东半岛近海月平均 Chl.*a* 和 TSS 数据。

1.3 再分析数据预处理

牡蛎的近海养殖还会受风浪的影响, 风浪越大, 越不适宜牡蛎育苗肥养殖。由于每日不同时间风浪数据不稳定, 且同一时间不同海域位置浪高差异较大, 所以本研究采用了哥白尼海洋环境监测局 (copernicus marine environment monitoring service, CMEMS) 提供的海洋再分析数据 GLORYS12V1 中的海水表面高度数据 (sea surface height, SSH) 作为影响牡蛎育苗肥养殖海浪强弱的环境因素。原始

数据时间分辨率为月平均, 空间分辨率为 1/12°, 使用 ArcGIS 10.7 软件进行双线性插值的方法, 重采样至空间 500 m 分辨率, 得到山东近海月平均 SSH 数据。

1.4 GIS 空间数据处理

养殖区与河口的距离越小, 海水盐度越低, 水体养料越丰富, 牡蛎养殖适宜性越好。本研究根据山东省水系图, 对山东省河口进行标记, 使用 ArcGIS 10.7 软件计算山东近海海域与河口的欧氏距离, 分别以距离河口 10、20 和 30 km 为界区分牡蛎养殖适宜性。

考虑到牡蛎的最适宜养殖区离岸距离一般不超过 15 km, 实验选取近岸 15 km 范围建立缓冲区作为掩膜文件, 使用 ArcGIS 10.7 软件对经过影像校正的海水表面环境数据进行掩膜提取, 得到近岸 15 km 范围的山东半岛近海月平均 SST、Chl.*a*、TSS、SSH 和河口距离数据。

1.5 长牡蛎生物学数据

模型校验所用长牡蛎数据来源于荣成桑沟湾的长牡蛎养殖区 (122°29'35.9"E, 37°3'31.5"N)。养殖方式为浮筏养殖, 养殖区水深约为 7 m。采样

日期为 2018 年 9 月—2019 年 2 月, 2019 年 9 月—2020 年 2 月。实验样品选择采用随机取样的方法, 每 30 天选取 20 只长牡蛎测量壳长和鲜肉重。本实验过程中操作人员严格遵守中国海洋大学实验动物管理和使用伦理委员会伦理规范, 并按照中国海洋大学学术委员会科学伦理专门委员会制定的规章制度执行。

1.6 DEB 模型及参数

本研究使用的 DEB 模型主要源自 Bourlès 等^[8]建立的应用于长牡蛎养殖的模型。由于山东莱州湾北部为黄河入海口, 水体含沙量高, 而高浊度又会对牡蛎摄食产生较大影响, 基于 Palmer 等^[19]的研究, 该实验补充了浑浊度对摄食的影响, 添加了受叶绿素影响的半饱和系数 x_k (3.0) 和受 TSS 影响的半饱和系数 x_{ky} (20.0) (表 1)。

储能含量 μ_E (17 550 J/g) 取自 Deslous-Paoli 等^[24]。形状系数 δ_M (0.175)、单位体表面积最大摄食率 $\{\dot{p}_{Xm}\}$ (560 J/(cm²·d))、单位体积维持耗能 $[\dot{p}_M]$ (24 J/(cm³·d))、单位体积结构物质所需能量

$[E_G]$ (1 900 J/cm³)、最大单位体积储能 $[E_M]$ (2 295 J/cm³)、生长和结构维持能量比例 κ (0.45)、阿伦尼乌斯温度 T_A (5 800 K)、生理代谢率下降的阿伦尼乌斯温度下限 T_{AL} (75 000 K)、生理代谢率下降的阿伦尼乌斯温度上限 T_{AH} (30 000 K) 和同化效率 ae (0.75) 取自 Van 等^[25]。繁殖能量比例 κ_R (0.7) 和结构物质体积 V_P (0.4 cm³) 取自 Pouvreau 等^[7]。温度耐受下限 T_L (276 K)、温度耐受上限 T_H (296 K) 和产卵性腺指数阈值 (gonado-somatic index, GSI) (0.4) 取自 Bourlès 等^[8]。单位体表面积最大吸收率 $\{\dot{p}_{Am}\}$ (770 J/(cm²·d)) 和参考温度 T_1 (293 K) 取自 Bernard 等^[26]。单位体积软体部干重 ρ (0.2 g·cm³) 取自 Bertolini 等^[27]。

1.7 模型运行与校正

DEB 模型使用 MATLAB R2021a 进行运算。提取桑沟湾地区 2018 年 9 月—2019 年 2 月的环境数据 SST、Chl.a 和 TSS 为模型运行的强制变量, 结合对应实测长牡蛎壳长和鲜肉重数据, 计算养殖过程中, 壳长和鲜肉重模拟与实测结果的最小

表 1 DEB 模型中所用的主要关系式

Tab. 1 Main functions of the DEB model

描述 description	函数 equation
温度依赖关系 temperature dependence	$k_T = k_1 \cdot \exp\left\{\frac{T_A}{T_1} - \frac{T_A}{T}\right\} \cdot \left(1 + \exp\left\{\frac{T_{AL}}{T} - \frac{T_{AL}}{T_L}\right\} + \exp\left\{\frac{T_{AH}}{T} - \frac{T_{AH}}{T}\right\}\right)^{-1}$
摄食率 ingestion rate	$\dot{p}_X = \{\dot{p}_{Xm}\} \cdot f \cdot V^{2/3}$
摄食同化率 assimilation rate	$\dot{p}_A = ae \cdot \mu_X \cdot \dot{p}_X = \{\dot{p}_{Am}\} \cdot f \cdot V^{2/3}$
食物的功能性反应 functional response	$f = \frac{X}{X + K(Y)}$
综合半饱和系数 total half saturation constant	$K(Y) = X_k \left(1 + \frac{Y}{X_{ky}}\right)$
单位体积储能 storage density	$[E] = \frac{E}{V}$
代谢率 catabolic rate	$\dot{p}_C = \frac{[E]}{[E_G] + \kappa[E]} \cdot \left(\frac{[E_G]\{\dot{p}_{Am}\}^{\frac{2}{3}}}{[E_M]} + [\dot{p}_M]V\right)$
维持率 maintenance rate	$\dot{p}_M = [\dot{p}_M] \cdot V \cdot k_T$
繁育维持率 maturity maintenance rate	$\dot{p}_J = \min(V, V_P) \cdot [\dot{p}_M] \cdot \left(\frac{1 - \kappa}{\kappa}\right) \cdot k_T$
储能变化率 reserve dynamic	$\frac{dE}{dt} = \dot{p}_A - \dot{p}_C$
体积增长储能变化率 biovolume growth	$\frac{dV}{dt} = \frac{\kappa \cdot \dot{p}_C - \dot{p}_M}{[E_G]}$
繁育储能变化率 reproductive reserve dynamic	$\frac{dE_R}{dt} = (1 - \kappa) \cdot \dot{p}_C - \dot{p}_J$
软体部分干重 dry tissue mass	$DFM = \frac{E}{\mu_E} + \frac{\kappa_R \cdot E_R}{\mu_E} + V \cdot \rho$

均方根, 对模型的 x_k 和 x_{ky} 进行校正。初始壳长设置为 8 cm, 初始繁育储能 E_R 为 0。模拟日期为 2011 年—2019 年, 每年 9 月—次年 2 月底, 共 180 d。根据评价指标的重要性, 将肉重、壳长、欧氏距离和 SSH 数据分别赋予 40%、30%、20% 和 10% 的权重进行叠加, 得到养殖适宜性分布图。

2 结果

2.1 长牡蛎 DEB 模型的验证

使用 2019 年 9 月—2020 年 2 月的实测数据, 根据模型结果计算确定系数 R^2 , 对模型进行检验, 得到桑沟湾海域长牡蛎生长的实测值与模拟值的线性回归结果 (图 2)。壳长和鲜肉重的模拟值与实测值呈极显著线性相关 ($P < 0.01$), R^2 分别为 0.94 和 0.96, 该模型可以较好地模拟并反映长牡蛎壳长和鲜肉重在育肥养殖过程中的变化情况。

2.2 长牡蛎壳长和鲜肉重的概率密度分布

本研究将 2011 年—2019 年间每年所有数据进行模拟, 研究海域的所有栅格共运行 68 797 次 DEB 模型, 9 年数据共计运行 619 173 次, 最后汇总所得的育肥长牡蛎壳长和鲜肉重最终结果, 并计算其概率密度分布 (图 3)。壳长和鲜肉重的概率分布函数斜率均先增后减, 在概率密度值为 50% 左右达到最大斜率。根据概率密度范围, 将壳长和鲜肉重各分为 4 等级, 各等级对应养殖适宜性的高低。第一级为不适宜, 概率密度为 0~0.2, 对

应壳长小于 9.63 cm, 鲜肉重小于 8.90 g; 第二级为一般, 概率密度为 0.2~0.5, 对应壳长大于 9.63 cm 小于 9.87 cm, 鲜肉重大于 8.90 g 小于 9.96 g; 第三级为较适宜, 概率密度为 0.5~0.8, 对应壳长大于 9.87 cm 小于 10.08 cm, 鲜肉重大于 9.96 g 小于 10.85 g; 第四级为非常适宜, 概率密度为 0.8~1.0, 对应壳长大于 10.08 cm, 鲜肉重大于 10.85 g。

2.3 山东长牡蛎育肥养殖适宜性空间分布

利用 SST、Chl. a 和 TSS 浓度数据, 导入经校验的长牡蛎 DEB 模型, 结合 SSH 和河口距离数据, 以及图 3 鲜肉重和壳长适宜性评价指标的平均值, 得到山东半岛长牡蛎秋冬季育肥养殖适宜性空间分布图 (图 4)。适宜性指数分布呈现离岸越远, 养殖适宜性越低的空间分布。山东半岛低纬度海域 (桑沟湾以南) 的养殖适宜性等级主要为较适宜, 占 76%; 高纬度海域 (桑沟湾以北) 的养殖适宜性等级为一般, 占 41%。非常适宜养殖区集中分布于潍坊市北部、烟台市北部、荣成市东北部、乳山市南部和青岛市南部海域。此结果与乳山地区实际的长牡蛎秋冬季育肥养殖区域一致^[5]。

2.4 不同海域长牡蛎秋冬季育肥养殖适宜性分析

2011—2019 年山东半岛 4 个海域长牡蛎秋冬季育肥养殖平均适宜性得分的比例如图 5 所示。

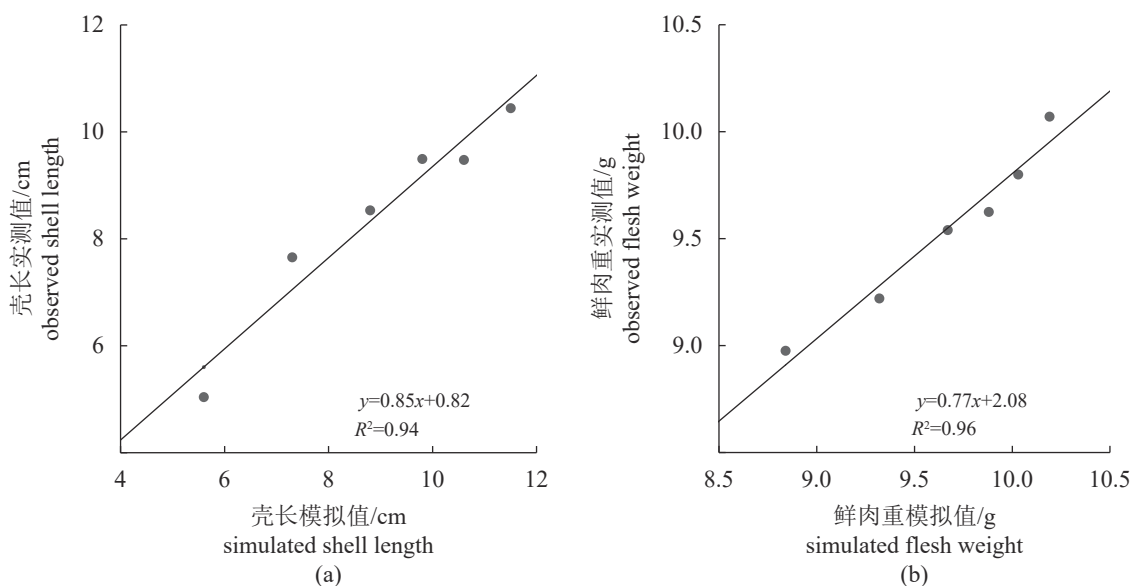


图 2 桑沟湾长牡蛎壳长 (a)、鲜肉重 (b) 模拟值与实际值结果的比较

Fig. 2 Comparison of observations and simulations of shell length (a) and flesh weight (b) of *C. gigas* in Sanggou bay

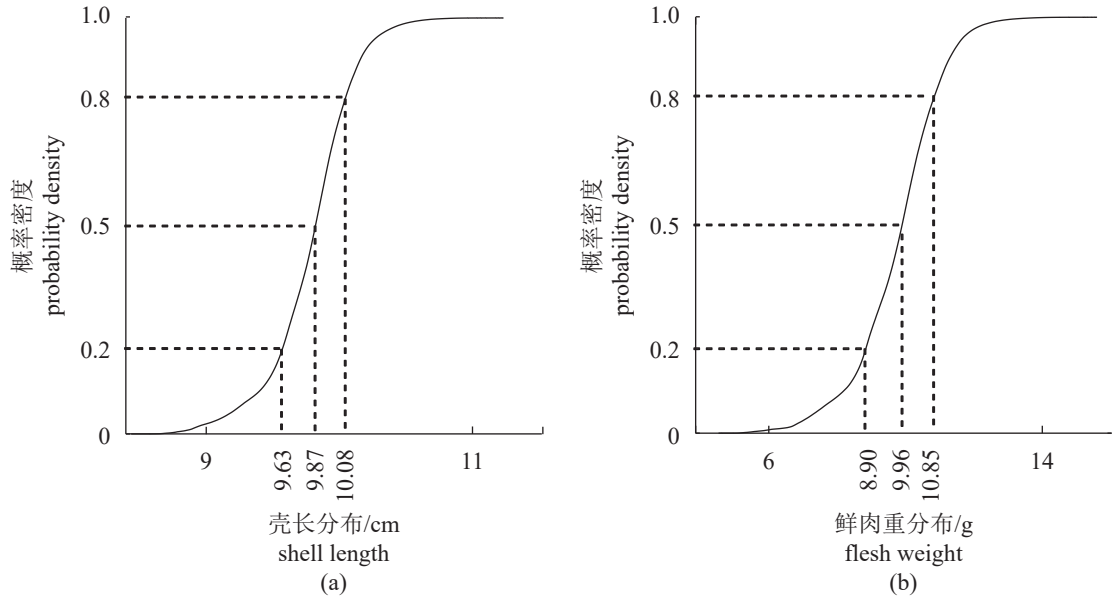


图3 壳长 (a) 和鲜肉重 (b) 模拟结果的概率密度分布

Fig. 3 Probability density of shell length (a) and flesh weight (b) simulation results

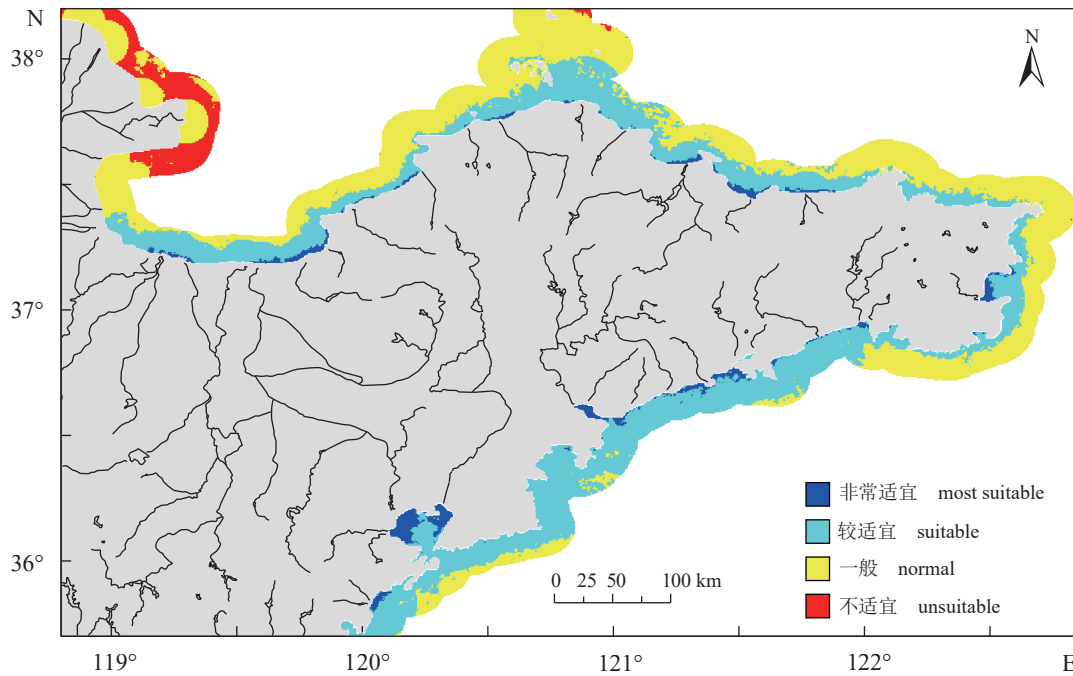


图4 山东近海长牡蛎育肥养殖适宜性空间分布

Fig. 4 Suitability map of *C. gigas* fattening aquaculture in Shandong coastal area

南部海域非常适宜的区域面积占比最大, 为9.1%; 东部海域、北部海域和西部海域非常适宜的区域面积接近, 占比均小于南部海域, 分别为2.2%、3.4%和1.6%。对于育肥养殖的较适宜区域, 南部海域面积占比最大, 为77.4%; 东部海域和北部海域的较适宜区域面积占比接近, 分别为36.4%和38.4%; 西部海域相对较少, 为22.4%。南部海

域和东部海域不存在不适宜养殖区域, 北部海域仅有0.5%为不适宜养殖区域。结果显示, 山东半岛南部海域, 包括青岛南部海域和乳山周边海域, 是长牡蛎秋冬季育肥养殖的最理想区域; 山东半岛东部和北部的近岸海域, 包括烟台市北部和荣成市东部, 亦可进行长牡蛎的秋冬季育肥养殖。

西部海域海水环境内部差异较大。海域内北

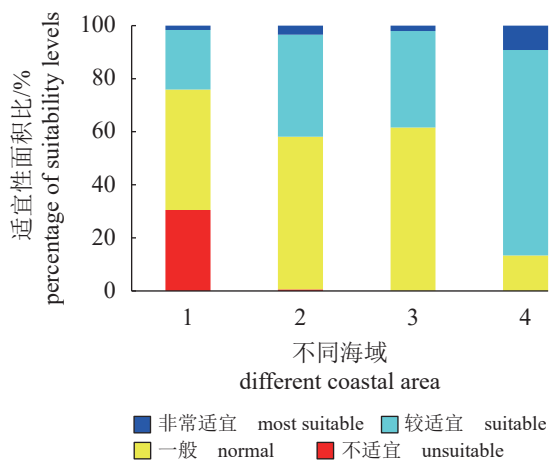


图5 山东近海四个研究海域长牡蛎育肥养殖适宜性海域面积占比

1. 西部海域, 2. 北部海域, 3. 东部海域, 4. 南部海域。

Fig. 5 Percentage of suitability levels of *C. gigas* fattening aquaculture in four zone of Shandong coastal area

1. western coastal area, 2. northern coastal area, 3. eastern coastal area, 4. southern coastal area.

部为黄河口, 周边海域受泥沙的影响, 不适宜进行长牡蛎的秋冬季育肥养殖, 不适宜面积占比高达该海域的 30.5%。西部海域南部为潍坊莱州湾内湾海域, 浑浊度相对较低且叶绿素含量相对较高, 存在部分非常适宜养殖海域和较适宜养殖海域, 可进行长牡蛎的秋冬季育肥养殖。

3 讨论

3.1 海水环境变化对养殖适宜性空间分布的影响

以往研究表明, 海水温度的骤变会导致牡蛎的减产甚至大规模死亡^[28]。但是在适宜温度范围内, 温度的增高可以加速生理反应速率, 促进牡蛎代谢速率, 加速生长发育, 养殖适宜性也就越高^[7]。山东半岛南部海域秋冬季水体温度较其他研究海域高(图 6, 图 7), 所以山东半岛南部海域秋冬季平均育肥养殖适宜性指数较高, 存在大面积的非常适宜养殖的区域和较适宜养殖区域。

牡蛎的进食受到水体中无机悬浮颗粒物的影响, 颗粒物过多会使牡蛎的进食受阻, 导致牡蛎长时间处于避壳状态, 持续消耗牡蛎鲜肉中所存贮的脂肪, 甚至导致牡蛎的死亡^[29]。黄河每年携带大量的泥沙流向海水, 黄河口海域水体浑浊度常年较大。受黄河的影响, 山东半岛西部海域

TSS 浓度要远高于其他研究海域(图 6, 图 7), 牡蛎摄食率显著低于其他海域, 不利于长牡蛎的生长发育, 所以存在大面积的不适宜养殖区域(图 4)。山东半岛东部和北部部分近岸海域, 如烟台市北部和荣成市东部, 虽然秋冬季 SST 稍低于南部海域, 但是 Chl.a 浓度相对更高且 TSS 浓度较低, 饵料丰富的同时水质清澈, 牡蛎的摄食率更高, 因此较适宜进行长牡蛎的秋冬季育肥养殖。

牡蛎的养殖还受海洋表面风浪的影响。风浪大时, 牡蛎会由于应激反应将壳紧闭, 进食时间大大缩短, 从而造成产量的降低^[3]。受东亚冬季风的影响, 山东半岛北部近岸海域秋冬季 SSH 较高(图 6), 养殖过程中受风浪的影响较大; 山东半岛南部近海, 如乳山附近海域, 秋冬季 SSH 较低, 与其他近海海域相比风浪较小, 更适宜进行牡蛎的育肥养殖。

3.2 海水环境变化对养殖适宜性季节变动的影响

每年 9 月—次年 2 月, 4 个海区的 SST 均呈现规律性的逐月降低(图 7-a)。秋季水温下降迅速, 平均每月降低 5 °C; 冬季水温下降速率平缓, 平均每月降低 2 °C。山东半岛不同海区水温的高低受纬度影响较大, 最高水温出现在山东半岛南部海域, 2012、2017—2019 年的 9 月最高温超过 20 °C; 西部海域的月平均水温最低, 2013、2015 和 2016 年的 1 月最低水温低于 1 °C。

SSH 的高低受秋冬季海风应力强度、海浪、海流和海水密度的综合影响^[30-31], 海风应力越强、海浪越大、冷水团距离越远、海水密度越小, SSH 越高。山东近岸海域各年逐月 SSH 呈现先增后减的趋势(图 6-b, 图 7-b)。2011、2015 和 2018 年, 9—10 月 SSH 均有不同幅度的减少; 其余年份 9—10 月 SSH 均有 5 cm 以上的提升, 并在 10 月达到最高值。每年 11 月—次年 2 月, 海风、海浪和海水密度均增大, 但海水密度的变化值高于海风、海浪, 4 个海区的 SSH 总体减少; 2014 和 2017 年减少量最多, 均接近 30 cm。

山东半岛沿岸海域的 TSS 季节性变化主要受到风浪的影响, 海浪尺度随风力的增加而增大, 海水的扰动强度相应增加, 在阻止原来海水中悬浮颗粒下沉的同时还可以掀动海底的泥沙, 使泥沙悬浮于水中^[32]。故 TSS 浓度每年秋冬季总体趋势先增后减, 西部海域远高于其他海域, 2012、2015 和 2016 年均大于 30 g/L; 南部海域 TSS 很低

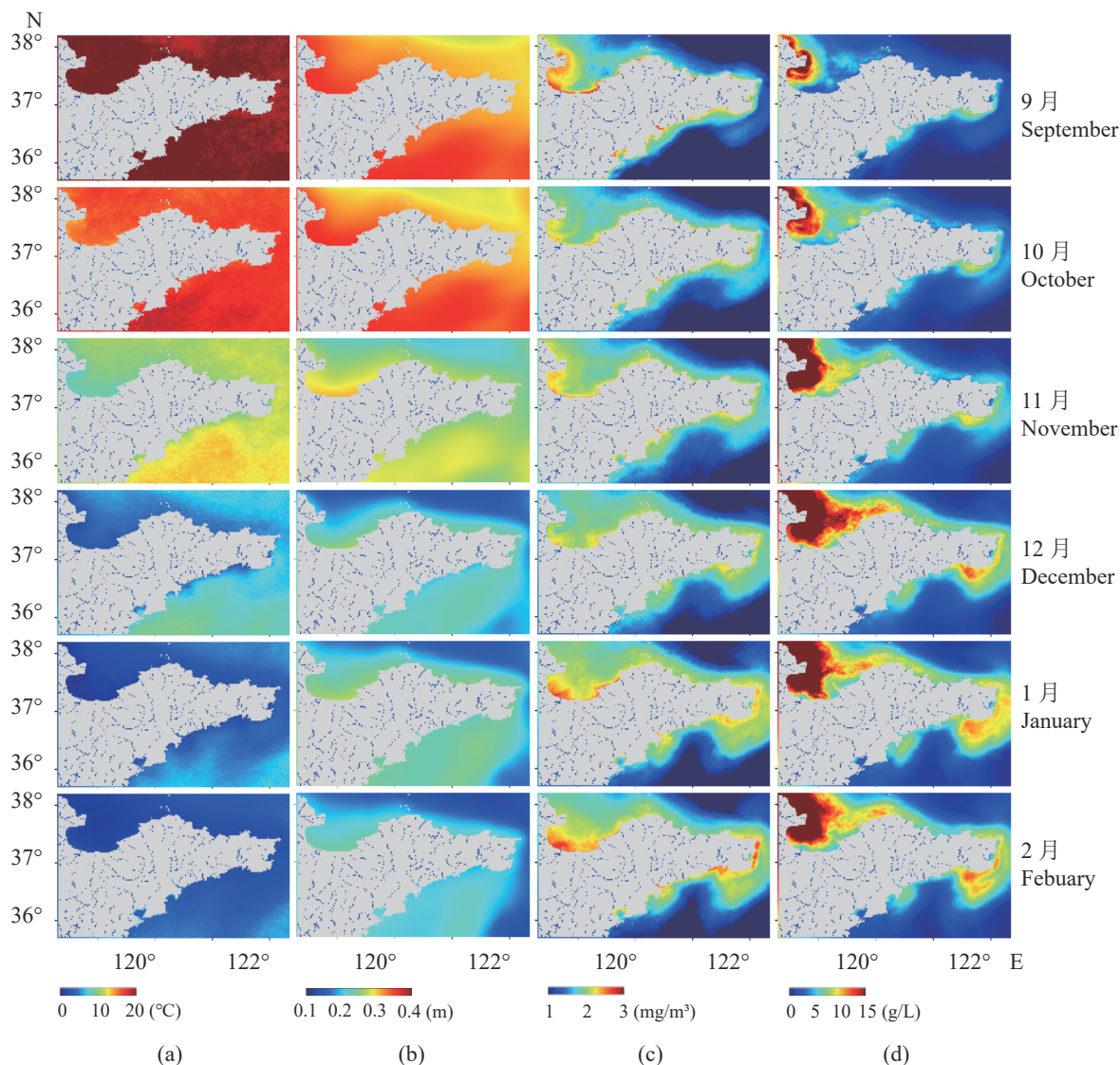


图 6 山东近海育肥养殖各月环境数据年平均分布

(a) 海水表层温度; (b) 海水表面高度; (c) 叶绿素 a 浓度; (d) 悬浮颗粒物浓度。

Fig. 6 Distribution map of marine environment in each aqua-month in Shandong coastal area

(a) SST, (b) SSH, (c) Chl.a, (d) TSS.

且不随季节变动, 低于 10 g/L (图 7-c)。

山东半岛沿岸海域的 Chl.a 的季节性变化主要受到温度和海流的影响。秋季相较于夏季海水温度骤降, 浮游植物生物量减少, Chl.a 浓度降低; 冬季太阳光照时长较短且海水温度最低, 虽然不利于浮游植物的大面积增长, 但冬季季风的盛行加强了海水的涡动混合和对流混合作用, 海水底层的营养盐和生物碎屑被上升流带到表层, 对表层浮游植物的生长有促进作用, Chl.a 浓度升高且平均值高于秋季^[33]。故 Chl.a 浓度每年总体趋势先减后增, 西部海域 Chl.a 浓度最大; 东部海域和北部海域的 Chl.a 浓度较为接近; 南部海域各年

的浓度最低, 均低于 2 mg/m³ (图 7-d)。

对于山东半岛近岸海域, 牡蛎育肥养殖初期 (秋季), 是育肥养殖的黄金时期, 此时水温较为适宜, Chl.a 浓度较高、饵料丰富, TSS 浓度较低、水质清澈, 利于牡蛎的进食。当从秋季进入冬季, 随着 SST 和 Chl.a 浓度的降低, 生理反应速率和摄食率均会降低, 牡蛎生长速率减缓, 养殖适宜性也逐渐降低。

2011、2012、2014 和 2015 年, 长牡蛎秋冬季育肥养殖的非常适宜区域面积分别为 2.9%、7.2%、6.9% 和 3.8% (图 8), 均小于近海海域的 10%。这 4 年的秋冬季平均 SST 分别为 6.5、7.8、

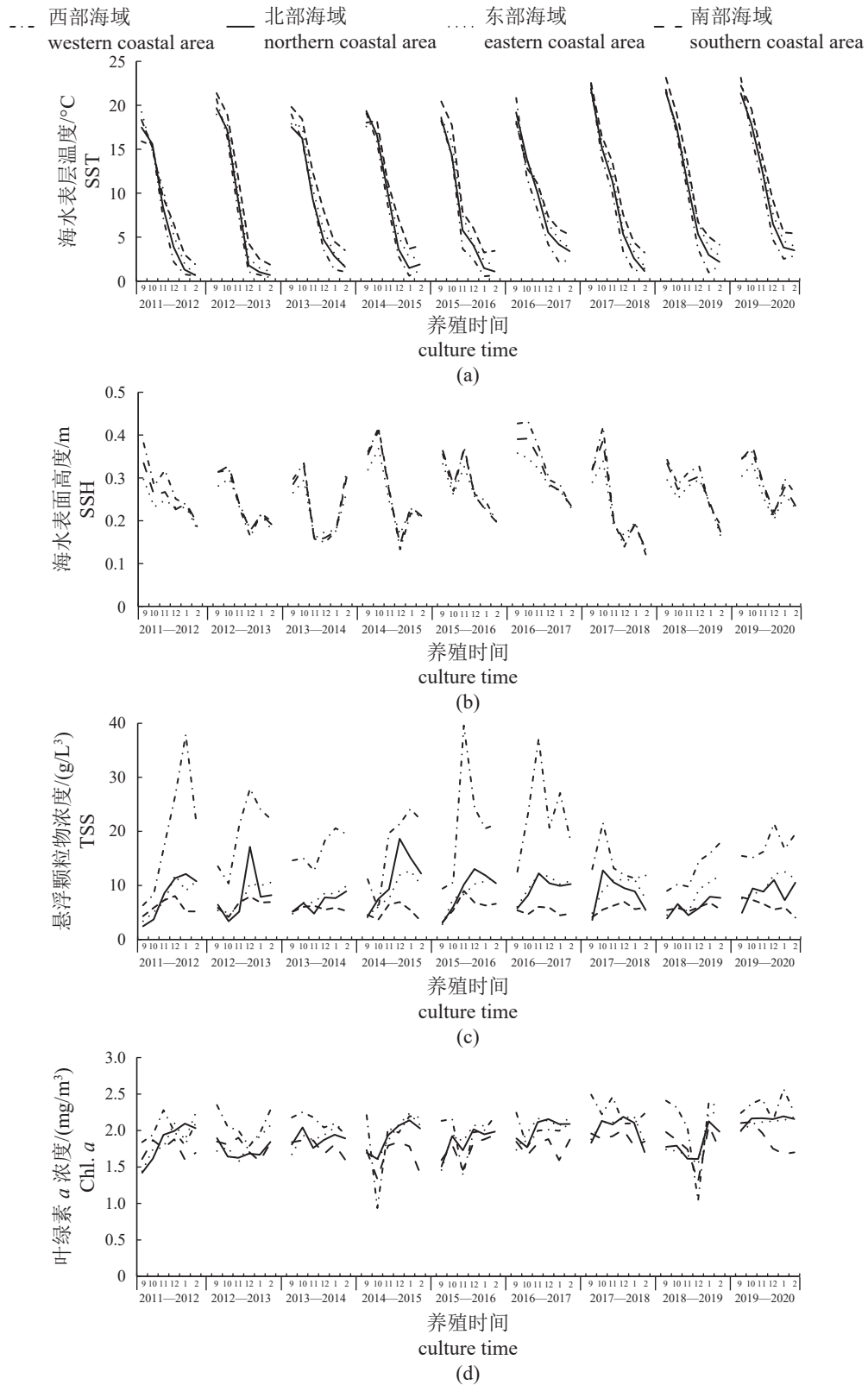


图 7 2011—2019 年的每年 9 月—次年 2 月山东近海 4 个海域环境数据变化时间序列

(a) SST, (b) SSH, (c) TSS 浓度, (d) Chl.a 浓度。

Fig. 7 Time series of monthly environment variation for the four zones of Shandong coastal area each year from September to February in the next year from 2011 to 2019

(a) SST, (b) SSH, (c) TSS, (d) Chl.a.

8.8 和 5.2 °C, 均显著低于其余年份 (图 7-a); 且 2011 年秋冬季平均 SSH 为 0.27 m, 显著高于其他年份 (图 7-b), 故山东半岛大部分海域牡蛎秋冬季

生长较往年更缓慢, 导致长牡蛎平均养殖适宜性指数较低。

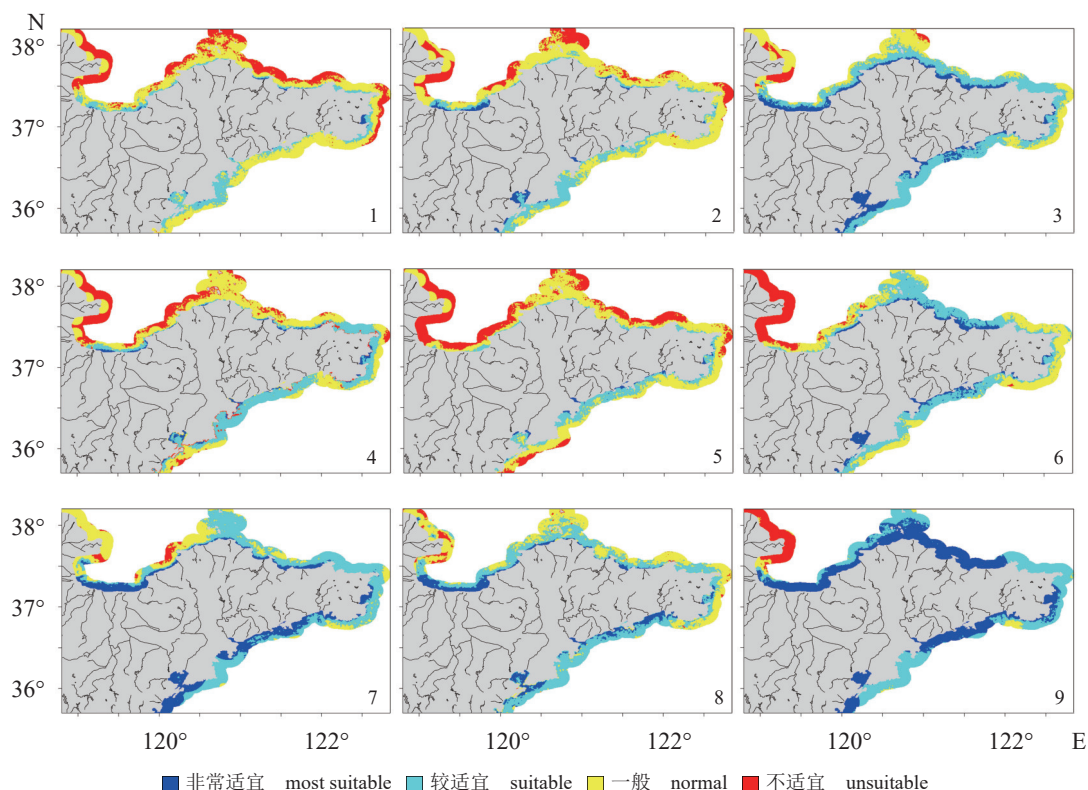


图 8 2011—2019 年的每年 9 月—次年 2 月山东近海长牡蛎育肥养殖适宜性空间分布

图中 1~9 分别对应 2011 年—2019 年。

Fig. 8 Suitability maps of *C. gigas* fattening aquaculture in Shandong coastal area from September to February in the next year from 2011 to 2019

Graphs 1-9 refer to the years from 2011 to 2019.

2013、2016 和 2018 年, 长牡蛎秋冬季育肥养殖的非常适宜区域面积分别为 24.2%、18.3% 和 21.8%。各海域秋冬季平均 SST 均高于 10 °C (图 7-a), 牡蛎生长速率较快, 长牡蛎平均养殖适宜性指数较高。2017 和 2019 年, 长牡蛎秋冬季育肥养殖的非常适宜区域面积分别占近海海域面积的 38.2% 和 57.9%, 秋冬季平均 SST 均高于 12 °C; 冬季最低 SSH 均小于 0.2 m (图 7-b); 平均 Chl.a 浓度分别为 2.01 和 2.12 mg/m³(图 7-d), 均显著高于其余年份, 山东半岛近海整体海域牡蛎的代谢速率和摄食率均有较大提升, 长牡蛎平均养殖适宜性指数最高。

3.3 结合遥感技术开发 DEB 模型的优势

以往我国近海的贝类 DEB 模型, 均仅考虑某个海域养殖站位的养殖状况, 未考虑不同海域的

环境差异, 具有较大的局限性。运用遥感技术, 可以弥补大空间尺度上实际海洋环境数据难以采集的问题, 连续获取长时间序列的海洋表面大面积范围的环境数据, 监测环境变化。传统的水产养殖区域选址模型, 是将海洋环境数据与物种的适宜性直接对应, 用加权求和的方法确定养殖适宜性指数^[15-17], 没有考虑到物种生长发育各个阶段的适宜性差异。结合生物学模型进行养殖适宜性选址的方法, 可以将生物的生理特征参数作为影响适宜性指数的参数^[18-19], 分析不同海域生物生长的生理差异。本研究选取山东半岛近海 15 km 范围内的海域作为对象, 使用构建的 DEB 模型, 可以从空间上和生理特征上更直观地区分不同海域的养殖差异。

近海养殖长牡蛎的生长发育受浮游植物丰度、

水体浑浊度和水温的多重影响, 研究表明, 尽管夏季水体中饵料丰富, 但高温对牡蛎的生长抑制强烈^[34]。秋冬季水温较温和, 可以使得牡蛎的养殖死亡率大大降低。结合遥感技术, 从构建的 DEB 模型模拟和乳山地区的实际育肥养殖状况看, 牡蛎的秋冬季育肥养殖技术, 可以有效地避免夏季高温所带来的高死亡率的问题, 建议养殖户合理利用适宜海域开展育肥养殖。

4 结论

本实验根据遥感获取的海水表面环境数据, 结合实测生物学数据, 使用动态能量收支模型, 绘制了山东半岛长牡蛎秋冬季育肥养殖适宜性分布图, 分析了山东半岛长牡蛎秋冬季育肥养殖的最适宜区域。黄河口海域由于海水浑浊度较高, 不适宜进行长牡蛎的秋冬季育肥养殖。山东半岛北部和东北部部分近岸海域, 如烟台市北部和荣成市东部, 由于饵料丰富且水质清澈, 适合进行长牡蛎的秋冬季育肥养殖。山东半岛南部的部分海域, 如青岛市南部和乳山市南部, 秋冬季水温更暖, 长牡蛎可以持续生长发育, 非常适合进行育肥养殖。本研究结果可为养殖管理部门提供山东半岛长牡蛎秋冬季育肥最适宜养殖区的分布变动信息, 促进长牡蛎秋冬季育肥养殖技术的推广与应用, 为我国海水养殖业的空间规划发展提供科学依据。

感谢荣成市荣金牡蛎养殖有限公司对本研究提供的帮助。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 杨红生. 我国蓝色粮仓科技创新的发展思路与实施途径[J]. 水产学报, 2019, 43(1): 97-104.
Yang H S. Development ideas and implementation approaches of blue granary scientific and technological innovation in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(1): 97-104 (in Chinese).
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会编制. 中国渔业统计年鉴-2024[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's
- Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2024 (in Chinese).
- [3] 杨爱国, 燕敬平. 鲍鱼牡蛎养殖 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006.
Yang A G, Yan J P. Aquaculture of abalone and oyster[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2006 (in Chinese).
- [4] 孟伟, 宋建忠, 曲红霞, 等. 浅海养殖新模式——太平洋牡蛎易地育肥[J]. 中国水产, 2004(2): 62-63.
Meng W, Song J Z, Qu H X, et al. A new model of coastal raft-fattening technology of pacific oyster[J]. China Fisheries, 2004(2): 62-63 (in Chinese).
- [5] 姜守轩, 杨化林. 贝类养殖技术之四太平洋牡蛎浅海筏式育肥技术[J]. 中国水产, 2006(12): 48.
Jiang S X, Yang H L. Coastal raft-fattening technology of Pacific oyster[J]. China Fisheries, 2006(12): 48 (in Chinese).
- [6] Kooijman S A L M. Dynamic energy budget theory for metabolic organisation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [7] Pouvreau S, Bourles Y, Lefebvre S, et al. Application of a dynamic energy budget model to the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, reared under various environmental conditions[J]. Journal of Sea Research, 2006, 56(2): 156-167.
- [8] Bourlès Y, Alunno-Bruscia M, Pouvreau S, et al. Modelling growth and reproduction of the Pacific oyster *Crassostrea gigas*: advances in the oyster-DEB model through application to a coastal pond[J]. Journal of Sea Research, 2009, 62(2-3): 62-71.
- [9] 张继红, 吴文广, 徐东, 等. 虾夷扇贝动态能量收支模型参数的测定[J]. 水产学报, 2016, 40(5): 703-710.
Zhang J H, Wu W G, Xu D, et al. The estimation of dynamic energy budget (DEB) model parameters for scallop *Patinopecten yessoensis*[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(5): 703-710 (in Chinese).
- [10] 张继红, 吴文广, 刘毅, 等. 虾夷扇贝动态能量收支生长模型[J]. 中国水产科学, 2017, 24(3): 497-506.
Zhang J H, Wu W G, Liu Y, et al. A dynamic energy budget (DEB) growth model for Japanese scallop *Patinopecten yessoensis* cultured in China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(3): 497-506 (in

- Chinese).
- [11] Jiang W W, Lin F, Du M R, *et al.* Simulation of Yesso scallop, *Patinopecten yessoensis*, growth with a dynamic energy budget (DEB) model in the mariculture area of Zhangzidao Island[J]. *Aquaculture International*, 2020, 28(1): 59-71.
- [12] 董世鹏, 蔺凡, 姜妮妮, 等. 胶州湾菲律宾蛤仔个体生长模型的构建与验证[J]. *渔业科学进展*, 2020, 41(4): 94-101.
- Dong S P, Lin F, Jiang W W, *et al.* Simulation and validation of Manila clam *Ruditapes philippinarum* growth with a DEB-based individual growth model in Jiaozhou Bay[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(4): 94-101 (in Chinese).
- [13] 何田妹, 晁敏. 文蛤动态能量收支模型参数的测定[J]. *海洋渔业*, 2020, 42(2): 225-232.
- He T M, Chao M. Estimation of dynamic energy budget (DEB) model parameters for *Meretrix meretrix*[J]. *Marine Fisheries*, 2020, 42(2): 225-232 (in Chinese).
- [14] 骆云慧, 吴波, 徐善良, 等. 缢蛭动态能量收支生长模型的建立[J]. *水产学报*, 2021, 45(4): 578-587.
- Luo Y H, Wu B, Xu S L, *et al.* Establishment of a dynamic energy budget (DEB) growth model for *Sinonovacula constricta*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(4): 578-587 (in Chinese).
- [15] 刘阳. 遥感技术在海水养殖适宜性研究中的应用与进展[J]. *福建师大福清分校学报*, 2021, 39(2): 101-111.
- Liu Y. Application and progress of remote sensing technology in the suitability research of mariculture[J]. *Journal of Fuqing Branch of Fujian Normal University*, 2021, 39(2): 101-111 (in Chinese).
- [16] 林勇, 刘述锡, 关道明, 等. 基于GIS的虾夷扇贝养殖适宜性综合评价——以北黄海大小长山岛为例[J]. *生态学报*, 2014, 34(20): 5984-5992.
- Lin Y, Liu S X, Guan D M, *et al.* GIS-based Japanese scallop (*Patinopecten yessoensis*) aquaculture suitability assessment: a case study with the islands of Dachangshan and Xiaochangshan, North Yellow Sea, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(20): 5984-5992 (in Chinese).
- [17] Liu Y, Tian Y J, Saitoh S I, *et al.* Impact of climate extremes on suitability dynamics for Japanese scallop aquaculture in Shandong, China and Funak Bay, Japan[J]. *Sustainability*, 2020, 12(3): 833.
- [18] Gernez P, Palmer S C J, Thomas Y, *et al.* Editorial: remote sensing for aquaculture[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 7: 638156.
- [19] Palmer S C J, Gernez P M, Thomas Y, *et al.* Remote sensing-driven Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) growth modeling to inform offshore aquaculture site selection[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 6: 802.
- [20] 管叙堂, 马永祥. 山东海水增殖养殖浅析[J]. *海洋科学*, 1984(1): 62-63.
- Guan X T, Ma Y X. Analysis on increasing mariculture in Shandong[J]. *Marine Sciences*, 1984(1): 62-63 (in Chinese).
- [21] 张晓东, 慕金波, 王艳, 等. 山东省河流水环境容量研究 [M]. 济南: 山东大学出版社, 2007.
- Zhang X D, Mu J B, Wang Y, *et al.* Study on water environmental capacity of rivers in Shandong Province[M]. Jinan: Shandong University Press, 2007 (in Chinese).
- [22] Siswanto E, Tang J W, Yamaguchi H, *et al.* Empirical ocean-color algorithms to retrieve chlorophyll-*a*, total suspended matter, and colored dissolved organic matter absorption coefficient in the Yellow and East China Seas[J]. *Journal of Oceanography*, 2011, 67(5): 627-650.
- [23] O'Reilly J E, Maritorena S, O'Brien M, *et al.* Ocean color chlorophyll *a* algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4[M]/Hooker S B, Firestone E R. SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses. Greenbelt: NASA, 2000: 9-23.
- [24] Deslous-Paoli J M, Héral M. Biochemical composition and energy value of *Crassostrea gigas* (Thunberg) cultured in the bay of Marennes-Oléron[J]. *Aquatic Living Resources*, 1988, 1(4): 239-249.
- [25] Van Der Veer H W, Cardoso J F M F, Van Der Meer J. The estimation of DEB parameters for various Northeast Atlantic bivalve species[J]. *Journal of Sea Research*, 2006, 56(2): 107-124.
- [26] Bernard I, De Kermoisan G, Pouvreau S. Effect of phytoplankton and temperature on the reproduction of the Pacific oyster *Crassostrea gigas*: investigation through DEB theory[J]. *Journal of Sea Research*, 2011, 66(4): 349-360.
- [27] Bertolini C, Brigolin D, Porporato E M D, *et al.* Testing a model of pacific oysters' (*Crassostrea gigas*) growth in the Adriatic Sea: implications for aquaculture spatial

- planning[J]. *Sustainability*, 2021, 13(6): 3309.
- [28] 廉伟, 温海深, 毛玉泽, 等. 长牡蛎夏季死亡与养殖环境及自身体质关系的初步研究[J]. *渔业科学进展*, 2010, 31(4): 92-100.
- Lian W, Wen H S, Mao Y Z, *et al.* Study on the relationship between pacific oyster *Crassostrea gigas* summer mortality with culture environment and organism condition[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(4): 92-100 (in Chinese).
- [29] Thomas Y, Pouvreau S, Alunno-Bruscia M, *et al.* Global change and climate-driven invasion of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) along European coasts: a bioenergetics modelling approach[J]. *Journal of Biogeography*, 2016, 43(3): 568-579.
- [30] 黄琳, 孙佳, 杨逸秋, 等. 北太平洋海表面高度(SSH)与风应力变化的关系[J]. *海洋与湖沼*, 2013, 44(1): 111-119.
- Huang L, Sun J, Yang Y Q, *et al.* Sea surface height (SSH) change and its relationship with wind stress in the north Pacific Ocean[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2013, 44(1): 111-119 (in Chinese).
- [31] 杨洋, 孙群, 杨敏, 等. 东中国海海面高度的时空变化特征[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(3): 481-489.
- Yang Y, Sun Q, Yang M, *et al.* Temporal and spatial variation of sea level of the east China sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(3): 481-489 (in Chinese).
- [32] 刘琳, 王珍岩. 山东半岛沿岸海域悬浮体时空分布及形成机制分析[J]. *海洋科学*, 2019, 43(10): 55-65.
- Liu L, Wang Z Y. Temporal and spatial distributions and formation mechanism of suspended sediment in the coastal area of the Shandong Peninsula[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(10): 55-65 (in Chinese).
- [33] 贾越平, 李微, 宋鑫, 等. 辽东湾表层叶绿素浓度时空变化遥感分析[J]. *海洋技术学报*, 2019, 38(1): 1-5.
- Jia Y P, Li W, Song X, *et al.* Remote sensing analysis of the temporal and spatial variations of sea surface chlorophyll concentration in the Liaodong bay[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2019, 38(1): 1-5 (in Chinese).
- [34] 毛玉泽, 周毅, 杨红生, 等. 长牡蛎(*Crassostrea gigas*)代谢率的季节变化及其与夏季死亡关系的探讨[J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(5): 445-451.
- Mao Y Z, Zhou Y, Yang H S, *et al.* Seasonal variation in metabolic rate of Pacific oyster, *Crassostrea gigas* and its implication to summer mortality[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(5): 445-451 (in Chinese).

Remote sensing and Dynamic Energy Budget-driven *Crassostrea gigas* autumn-winter fattening aquaculture suitability assessment in Shandong Peninsular

YIN Zixu¹, WANG Penghao¹, LIU Yang^{1*}, LI Chunlin¹, ZHANG Zhixin², LI Qi¹

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

2. Weihai Aquatic School, Weihai 264300, China)

Abstract: Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) is a widely aquaculture shellfish in China. Managing the coastal aquaculture area of *C. gigas* can increase the yield and reduce the losses caused by the environment in Shandong. With the development of remote sensing and artificial intelligence, convenient conditions are provided for evaluating suitability for aquaculture. The autumn-winter fattening aquaculture is an efficient aquaculture method for Pacific oysters. In this study, based on Dynamic Energy Budget (DEB) theory, sea surface temperature, chlorophyll-*a* and total suspended sediment data obtained by satellites and sea surface height reanalysis data, were used to construct an evaluation model for *C. gigas* suitability assessment in Shandong Peninsula. The results showed regional differences on the suitability index of fattening aquaculture in Shandong Peninsula, and the overall suitability trend was southern coastal area > northern coastal area > eastern coastal area > western coastal area. The most suitable aquaculture area in the southern coastal area was 9.1%, mainly in Rushan coastal. Several area in the Yellow River mouth area were unsuitable aquaculture area, accounting for as much as 30.5% of the area. The most suitable area of *C. gigas* fattening aquaculture in Shandong coastal area was 38.2% in 2017 and 57.9% in 2019, much more than those of other years. The autumn-winter fattening aquaculture in Shandong for *C. gigas* was better located in areas with less turbidity, higher chlorophyll-*a* concentrations, warmer temperatures and fewer waves. The Yellow River estuary was not suitable for the autumn-winter fattening aquaculture due to the high turbidity. The northern and northeastern coastal area of Shandong, such as the northern part of Yantai City and the eastern part of Rongcheng City, were suitable for the fattening aquaculture due to the abundance of Chl.*a* and clarity of water. In the southern coastal area of the Shandong, such as the southern part of Qingdao City and the southern part of Lushan City, SST was warmer in autumn and winter, allowing oysters to continue to grow and develop, which was ideal for fattening. The results of this study can provide effective quantification and scientific basis for *C. gigas* aquaculture suitability assessment in Shandong Peninsula.

Key words: *Crassostrea gigas*; satellite remote sensing; Dynamic Energy Budget (DEB); aquaculture suitability index; aquaculture zoning management

Corresponding author: LIU Yang. E-mail: Yangliu315@ouc.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (41976210)