

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20181024001

http://www.yykxjz.cn/

孙倩雯, 刘慧, 尚伟涛, 于良巨, 姜晓鹏, 蔡碧莹, 常丽荣, 肖露阳. 基于 GIS 的桑沟湾及周围海域海带养殖适宜性评价. 渔业科学进展, 2020, 41(1): 41-50

Sun QW, Liu H, Shang WT, Yu LJ, Jiang XP, Cai BY, Chang LR, Xiao LY. GIS-Based assessment for culture suitability of kelp (*Saccharina japonica*) in Sanggou Bay and the surrounding waters. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(1): 41-50

基于 GIS 的桑沟湾及周围海域 海带养殖适宜性评价*

孙倩雯^{1,2} 刘 慧^{2①} 尚伟涛^{3,4} 于良巨⁴
姜晓鹏^{3,4} 蔡碧莹^{1,2} 常丽荣⁵ 肖露阳⁵

(1. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071;
3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室
中国科学院烟台海岸带研究所 烟台 264003; 5. 威海长青海洋科技股份有限公司 荣成 264316)

摘要 目前水产养殖面临用海冲突、单位面积和人均生产率偏低、养殖业的生态和经济成本较高等问题。为充分利用海区的自然生产力,提高养殖效率和效益,需要对海区进行适宜性评价,选择最适宜的水域进行养殖。以桑沟湾及周围海域主要的养殖品种海带(*Saccharina japonica*)作为评价对象,选取光照、温度、流速、无机氮、盐度、深度作为适宜性评价指标,利用遥感技术确定海区养殖布局,通过野外调查和数据模拟获取养殖海区环境参数数据,根据动态能量学(Dynamic energy budget, DEB)模型——STELLA 模型敏感性分析结果,并结合层次分析法计算评价指标权重,海带生长相关环境因子的强制函数拟合得到单因子评分曲线进行评分。最后,采用线性加权叠加分析方法得到海带养殖适宜性评价结果。适宜性评价过程以地理信息系统(Geographical information systems, GIS)作为技术支持,利用 GIS 空间插值功能生成光照、温度、流速、无机氮、盐度、深度专题图层,采用栅格计算功能对各专题图层进行叠加,得到综合多因素的海带养殖适宜性评分和适宜性等级。评价结果显示,在不考虑用海冲突的情况下,桑沟湾及周围海域海带养殖适宜性分数分布在 0~6.7 范围内,分值主要集中在 4~6 分,属于中等适宜,占研究区总面积的 67%,最适宜和不适宜分别占研究区总面积的 23%和 10%,无一般适宜区。评分较高的区域主要分布在北部爱莲湾和楮岛东部海域周围,适宜性评分较低的区域主要位于近岸水深较浅的海域。根据适宜性评价结果可进行水域空间规划和安排养殖生产计划,为管理部门开展养殖分区和海洋功能区划提供参考。

关键词 水产养殖; 适宜性评价; 养殖区选址; GIS

中图分类号 S931.3 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2020)01-0041-10

养殖容量的基础是水域承载力的计算,传统的养殖容量评估一般是基于营养盐的供应或初级生产力

* 科技部国际创新合作专项“基于生态系统的水产养殖空间规划研究”(2016YFE0112600)和欧盟地平线 2020 项目(633476-H2020-SFS-2014-2015)共同资助[This work was supported by the Key Programme for International Cooperation on Scientific and Technological Innovation, Ministry of Science and Technology (2016YFE0112600), and Optimizing Space Available for European Aquaculture (AquaSpace) (633476-H2020-SFS-2014-2015)]. 孙倩雯, E-mail: gwen_sun@126.com

① 通讯作者: 刘 慧, 研究员, E-mail: liuhui@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2018-10-24, 收修改稿日期: 2018-11-15

水平,来估算水域可以养殖的藻类或者贝类的生物量(方建光等,1996)。但养殖容量并未考虑养殖生物的其他生理需求,例如光照、温度、盐度等,而这些条件对于养殖生物是否能够健康快速生长同样重要。养殖适宜性评价通过全面评估生物的环境适应性,来选择最适合养殖的水域,与养殖容量评估互为补充,可以更好地指导养殖规划。

未来水产养殖规划管理将基于生态学方法,平衡社会、经济、环境关系,尽可能缩小各因素间的不利影响(FAO,2017)。Gentry等(2017)利用生理、异速生长和生长理论的创新方法,对全球海水养殖潜力进行了量化评估,结果显示,中国的养殖产量超过预计潜力,反映出中国已开发大面积的海域发展水产养殖,存在超容量养殖。超高密度的水产养殖会带来不利的环境影响,造成海域使用冲突,并产生高昂的社会经济损失(Ottinger *et al.*,2016)。因此,为充分利用水域空间和自然生产力,增加养殖产量和生产效率,管理部门和养殖企业都需要对养殖区开展适宜性评价,从而了解水域适合养殖的品种和养殖规模,以便进行合理的空间规划与布局。

水产养殖品种的存活和生长在很大程度上依靠水域自然环境,水文、气候、水化学要素以及初级生产力等自然环境因子是影响养殖品种生长的主要因素。因此,水产养殖适宜性评价以国家政策法规、海洋功

能区划和水环境标准为依据,通过养殖生物的生理生态特性、生长所需的环境条件和养殖水域的环境要素进行分析比较,选择适合养殖生物生长的水域,为进行科学的养殖布局提供参考。由于养殖适宜性评价涉及的数据量大,故普遍采用地理信息系统(Geographical information systems,简称GIS)(Foresman,1998)的逻辑判断、评价分析和可视化展示功能,进行空间插值和专题图层叠加,对水产养殖区进行适宜性评价分析。在适宜性评价的基础上,通过进一步整合模型运算和环境参数,还可以对特定水域的水产养殖现状及发展前景做出科学合理的评价与预测(刘慧等,2018)。

1 研究方法

1.1 研究区和数据来源

1.1.1 研究区概况 桑沟湾是位于山东半岛东端的半封闭海湾(37°01'~37°09'N,122°24'~122°35'E),面积为133.3 km²,桑沟湾及周围爱莲湾和楮岛部分海域总面积约为448 km²(36°58'~37°12'N,122°23'E~122°42')(图1)。其地理环境优越,海底平坦,水质较好,湾内平均水深为7.5 m,有不规则半日潮(张朝晖等,2007)。年平均温度为13℃,2月水温最低,月平均温度为1.8℃;8月水温最高,月平均温度为24℃。环境调查发现,桑沟湾内全年海水盐度范围为29~32,

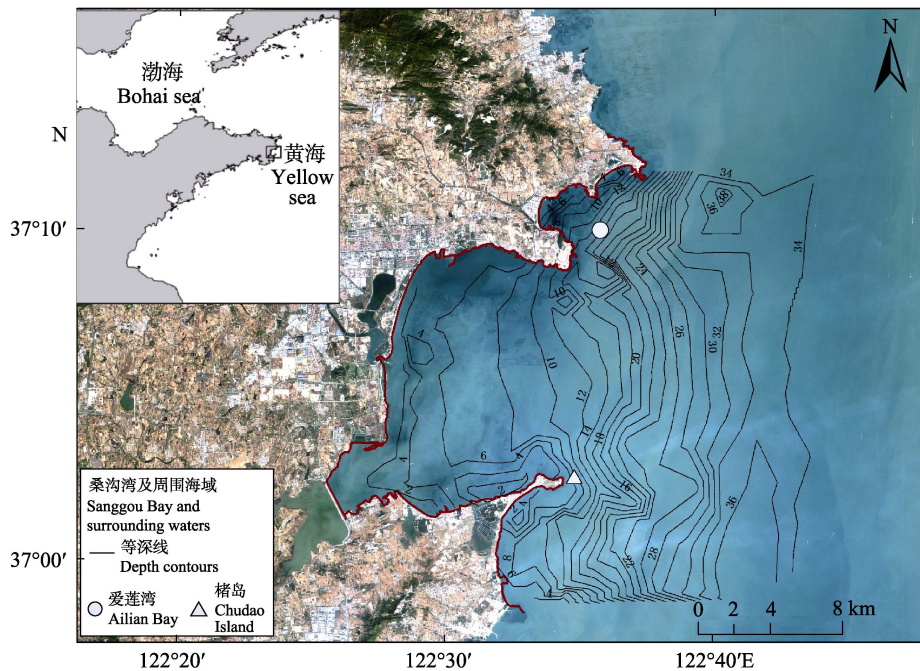


图1 海带养殖适宜性评价研究区地理位置及主要等深线

(数据来源: Copernicus Open Access Hub. <https://scihub.copernicus.eu/>)

Fig.1 The location and depth contours of the studied area for kelp aquaculture suitability assessment (Source: Copernicus Open Access Hub. <https://scihub.copernicus.eu/>)

太阳辐射强度为75~313 w/m², 平均日照时长为12 h (史洁, 2009), 适宜发展水产养殖。海带(*Saccharina japonica*)作为当地主要养殖品种, 年产量达10万t(干重)(蔡碧莹等, 2019), 且商品化程度高, 因此选取海带作为适宜性评价对象。

1.1.2 数据来源 根据海带生长发育的生理需求, 选取光照、温度、流速、无机氮、盐度、深度 6 个环境参数用于养殖适宜性评价。其中, 桑沟湾及周围海域地理信息数据由遥感获取(Source: Copernicus Open Access Hub. <https://scihub.copernicus.eu/>); 流速和水温数据来源于 FVCOM 模型(Finite volume coastal ocean model)基于动力方程对桑沟湾模拟得到(Xuan *et al*, 2016); 光照采用养殖海区平均海表光照强度, 通过晴雨天数以及每月日照时长计算获得, 数据来源于 2011 年中国气象局荣成市天气预报; 无机氮和盐度数据来源于对桑沟湾及周围海域 2011 年 4 个季度(4、8、10 月、2012 年 1 月)的大面调查。

1.2 评价指标的选择

适宜性评价指标根据海带生理生态学特点, 并结合桑沟湾养殖区地理和水环境特点进行筛选。影响海带生长的主要因素有光照、温度、流速、无机氮、盐度、深度。光照对海带生长有重要的影响, 光照强弱影响海带光合作用, 且光能够刺激大型海藻对营养盐的吸收(Lobban *et al*, 1994)。深度通过影响海带接受光照, 进而影响海带生长, 过浅的水深, 会限制海带长度的生长。海带生长受温度影响明显, 温度超过

17.5℃时, 海带叶片末梢枯烂率超过其生长率, 当温度降低时, 长海带(*Laminaria longicruris*)对 NO₃⁻的吸收速率降低(Suzuki *et al*, 2008; Harlin, 1978); 水动力是大型藻类生产的一个关键因素, 在其他环境因素不受限时, 若大型藻类生长的主流速度持续低于饱和水平, 其生产率降低, 且较弱的水动力影响营养盐的补充(Leigh *et al*, 1987; Wheeler, 1980)。无机氮是海带生长所需的主要营养盐, 藻类利用氮元素合成自身生长的蛋白质(Lobban *et al*, 1996)。盐度变化影响海水藻类光合作用同化速率(王宪等, 1991)。这些环境因子的变化对海带生长产生重要的影响, 因此, 将其作为环境因素的评价指标, 并汇总各评价指标对于海带生长的参数范围(表 1)。

1.3 权重计算

不同的环境因子对海带生长的影响程度不同, 需要根据各评价指标的重要程度赋予相应的权重。深度作为限制因素, 不赋予权重; 光照、温度、流速、无机氮、盐度的重要性等级排序参考海带生长动态能量学(Dynamic energy budget, DEB)模型——STELLA 模型敏感性分析结果(表 2)(蔡碧莹等, 2019)。DEB 模型可描述海带生长与环境参数的关系, 模拟结果与实测值拟合度高, 可较好地反演海带真实的生长过程(蔡碧莹等, 2019)。通过敏感性分析得出各环境因素对海带生长的影响程度排序, 结合层次分析法(AHP)(Saaty, 1977)构造对比矩阵, 计算各环境因子的权重(表 4)。

表 1 海带适宜性评价指标

Tab.1 The criteria for assessment of culture suitability of kelp *S. japonica*

养殖品种 Species	评价指标 Criteria	阈值范围 Threshold	适宜范围 Suitable range	参考文献 Reference
海带 <i>S. japonica</i>	温度 Temperature (°C)	0.5~20	5~10	陈达义等(1964); 吴荣军等(2009)
	流速 Velocity (cm/s)	2~80	50	Wheeler(1980); 张定民等(1982)
	无机氮 DIN (mg/L)	0.01 下限	0.15~0.25	海藻栽培信息网
	盐度 Salinity	3~40	29~32	陈根禄等(1958)
	光照强度 Light intensity (μmol/m ² ·s)	/	350	Duarte 等(2003)

1.4 评分

1.4.1 单因子评分 影响海带生长的环境因子评分采用 8 分制, 1~8 分表示环境条件对海带养殖适宜程度由低到高。采用海带生长相关环境参数的强制函数来拟合评分曲线。强制函数表示不同环境因子对海带生长速率的影响, 每个环境参数的强制函数均来自下列经验公式:

温度评分曲线采用经验公式温度方程(EPA, 1985):

$$f(T) = \exp \left[-2.3 \left(\frac{T - T_{opt}}{T_x - T_{opt}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中, T_x 为温度生态幅, T_{opt} 为最适宜温度, 当 $T < T_{opt}$ 时, $T_x = T_{min}$ (温度生态幅下限), 当 $T > T_{opt}$ 时,

$T_x=T_{\max}$ (温度生态幅上限)。

盐度评分曲线采用盐度限制函数(Martins *et al.*, 2002):

$$f(S) = \left(\frac{S - S_{\text{opt}}}{S_x - S_{\text{opt}}} \right)^m \quad (2)$$

式中, S_{opt} 为最适盐度, 当 $S < S_{\text{opt}}$ 时, $S_x = S_{\text{min}}$, $m=2.5$; 当 $S \geq S_{\text{opt}}$ 时, $S_x = S_{\text{max}}$, $m=2$ 。

流速评分方程采用藻类生长模型和水动力模型相耦合的流速曲线(Barr *et al.*, 2008)

$$f(v) = 20.55 + 7.33 \ln v \quad (3)$$

式中, v 为流速。

海带对氮的吸收特征符合饱和吸收动力学, 因此, 无机氮方程采用模拟 Monod 或 Michaelis-Menten 动力学方程(Kitadai *et al.*, 2003):

$$f(C_N) = \frac{C_N}{k_c + C_N} \quad (4)$$

式中, C_N 为总氮浓度, k_c 为 N 的半饱和同化系数。

光照评分采用光照限制函数(Steele, 1962):

$$f(I) = \frac{I}{I_{\text{opt}}} * e^{\left(1 - \frac{I}{I_{\text{opt}}}\right)} \quad (5)$$

式中, I 为海带表面光强, I_{opt} 为海带光合作用最适光强。

将表 1 中的参数值代入到对应的经验公式中得到单因子评分曲线(图 2), 根据曲线得到 1~8 分中每个分数段对应的参数范围, 以此作为海带养殖适宜性评分的依据。深度作为限制因素, 深度 < 5 m, 分值设置为 0; 深度 > 5 m, 分值设置为 1。

表 2 海带对各环境参数变化的敏感度(蔡碧莹等, 2019)

Tab.2 Sensitivity of kelp to the variation of environmental parameters (Cai *et al.*, 2019)

参数 Symbol	定义 Description	参数变化率 Change of parameter value (%)	敏感度 Sensitivity
I_{opt}	光合作用最适光强	+20	1.33
		-20	2.51
S_{opt}	最适生长盐度	+20	0.51
		-20	1.96
T_{opt}	最适生长温度	+50	0.39
		-50	0.78
N_{imax}	维持最大生长率	+50	0.30
		-50	0.73

将桑沟湾及周围海域光照、温度、流速、无机氮、盐度、深度的实测和模拟数据导入 ArcGIS, 采用空间插值方法生成各环境参数对应的专题图层。按照评分依据, 对各个环境参数的专题图层进行重分类处理, 每幅专题图层中, 按照评分标准赋予各参数范围对应的分值, 生成光照、温度、流速、无机氮、盐度、深度 6 幅单因子评分图层。

1.4.2 多指标综合评分 水产养殖适宜性评价涉及到多种因素, 由于这些因素的重要程度不同, 因而不能将指标图层简单地进行叠加。采用线性加权叠加分析(Malczewski, 2000)计算综合适宜性评分, 计算公式如下:

$$A_i = \sum_j w_j x_{ij}$$

式中, A_i 为评价对象像元的适宜性分数, w_j 为指标的权重, x_{ij} 为像元指标 j 的分数。

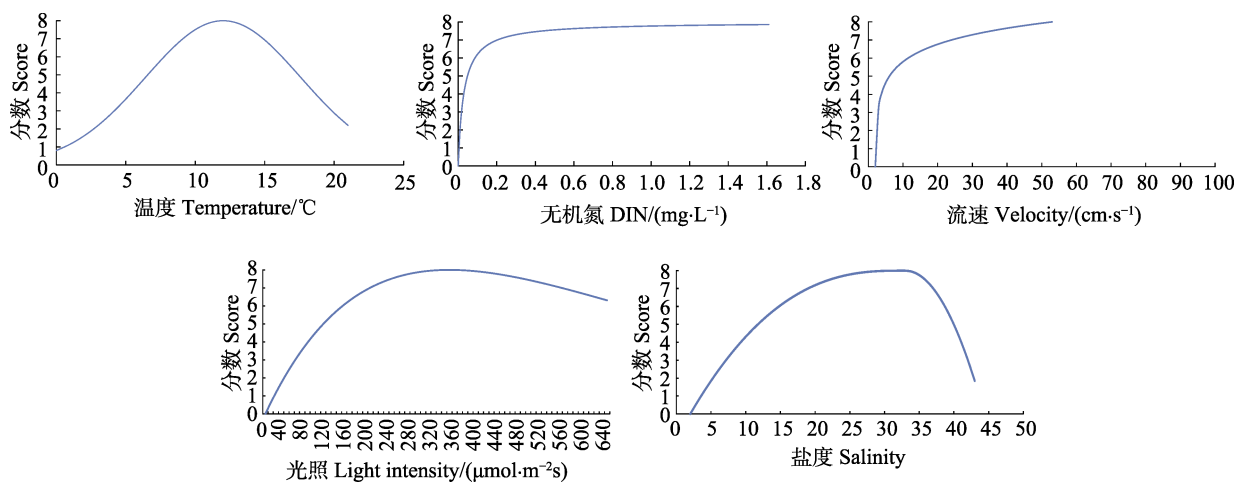


图 2 环境因素评分曲线(温度, 无机氮, 流速, 光照, 盐度)

Fig.2 The scoring curve of environmental variables (temperature, DIN, velocity, light intensity, and salinity)

将光照、温度、流速、无机氮、盐度、深度单因子评分图层进行重采样, 根据叠加分析, 利用 ArcGIS 栅格计算功能将各单因子评分图层进行叠加, 输出 4 个季度的适宜性评分图层, 图层显示, 综合各因素后每个季度的适宜性评分(1~8)。将每个季度的适宜性评分重新分类, 划分为最适宜、中等适宜、一般适宜和不适宜 4 个等级(表 3), 不同的适宜性等级表示海带养殖不同的适宜程度。最后, 综合 4 个季度的适宜性评分, 进行栅格图层叠加, 生成最终适宜性评分

图层和适宜性等级图层。

表 3 海带养殖适宜性等级划分
Tab.3 The classification for culture suitability level of the kelp

适宜性评分 Score	适宜性等级 Suitability level
0~2	不适宜 Unsuitable
2~4	一般适宜 Less suitable
4~6	中等适宜 Relatively suitable
6~8	最适宜 Optimal

表 4 海带养殖适宜性评价指标权重
Tab.4 The weighted indices of kelp culture suitability

指标 Indices	光照 Light intensity	温度 Temperature	流速 Velocity	无机氮 DIN	盐度 Salinity	权重 w_i
光照 Light intensity	1	2	3	4	5	0.4185
温度 Temperature	1/2	1	2	3	4	0.2625
流速 Velocity	1/3	1/2	1	2	3	0.1599
无机氮 DIN	1/4	1/3	1/2	1	2	0.0973
盐度 Salinity	1/5	1/4	1/3	1/2	1	0.0618

Consistency ratio (CR)=0.0152<0.1

2 结果

海带养殖适宜性评价结果显示, 桑沟湾及其周围海域适宜性分数分布在 0~6.7 范围内, 由桑沟湾近岸到离岸较远海域, 适宜性分值逐渐增大后减小, 评分较高的区域主要分布在北部爱莲湾和楮岛东部海域, 适宜性评分较低的区域主要位于近岸海域。适宜性分值主要集中在 4~6 分, 属于中等适宜(298.9 km²), 占研究区总面积的 67%, 最适宜(103.7 km²)和不适宜(45.4 km²)分别占研究区总面积的 23%和 10%, 没有分值分布在一般适宜(图 3 和图 5)。

2011 年 4 个季度适宜性评价结果显示, 春季适

宜性分值较高的区域呈块状分布, 夏季适宜性评分呈阶梯状, 评分分值由桑沟湾湾内向湾外方向递增, 且分值差距最大, 秋季适宜性高分区主要分布在爱莲湾和楮岛东部海域附近, 冬季较春、夏、秋季, 高分值区向桑沟湾湾内迁移(图 4a)。春、秋和冬季中等适宜海区面积占比最大, 分别占研究区总面积的 56%、86%和 78%, 夏季最适宜海区面积最大, 约占研究区总面积的 65%, 海带养殖期间, 4 个季节不适宜养殖区面积均为 45.4 km², 占研究区总面积的 10% (图 4b 和图 5)。

适宜性评价结果与现有养殖布局对比显示, 养殖区分布密集, 养殖筏架主要分布在中等适宜区域, 约

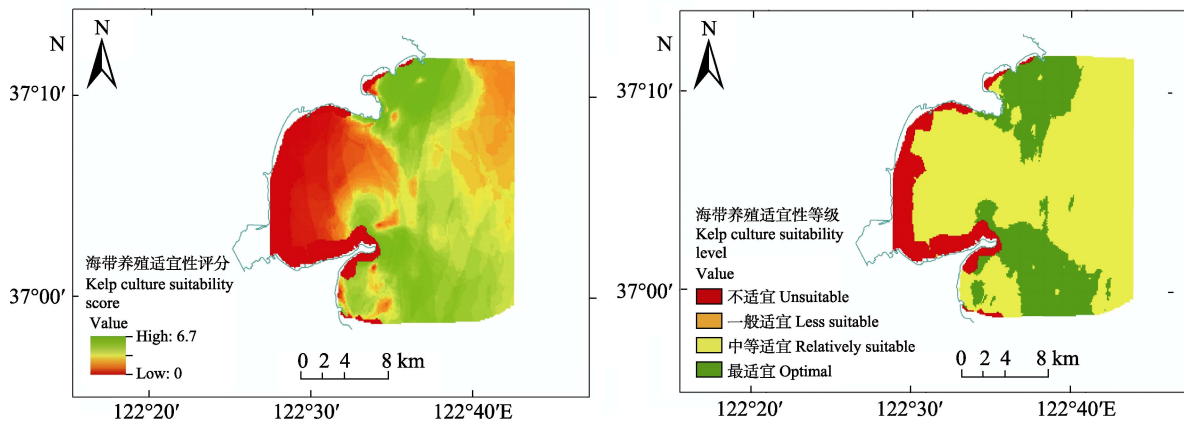


图 3 2011 年桑沟湾及周围海域海带养殖适宜性评分和适宜性等级

Fig.3 The score and level of kelp culture suitability in Sanggou Bay and the surrounding waters in 2011

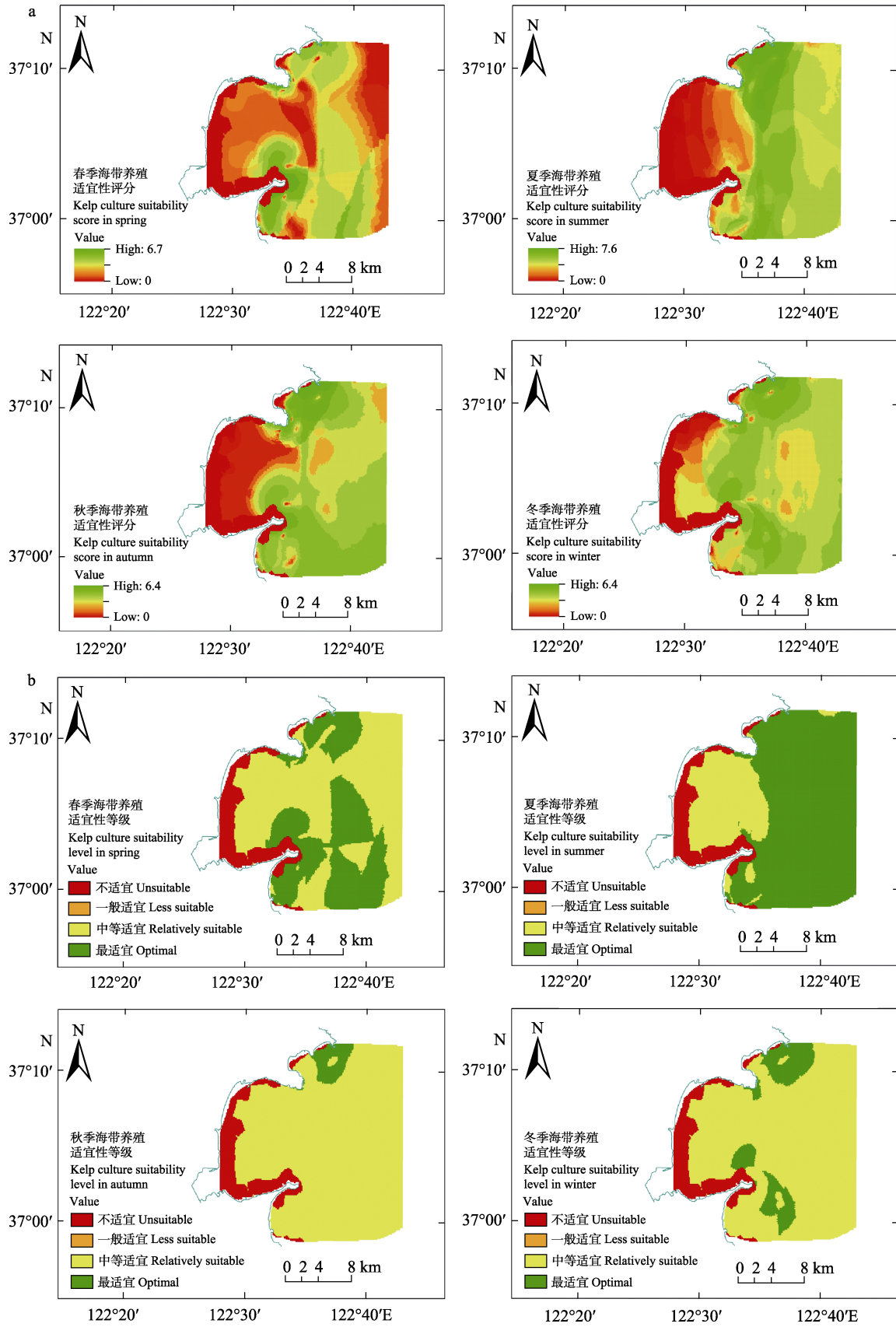


图4 2011年4个季度桑沟湾及周围海带养殖适宜性评分(a)和适宜性等级(b)

Fig.4 The suitability score (a) and the suitability level (b) of kelp culture for 4 quarters of 2011 in Sanggou Bay and the surrounding waters

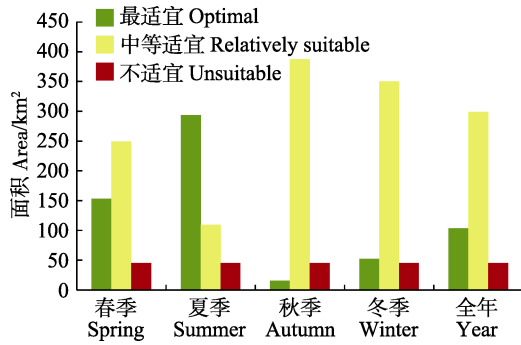


图 5 海带养殖各适宜性等级所占面积
Fig.5 Proportion of suitable areas for kelp culture

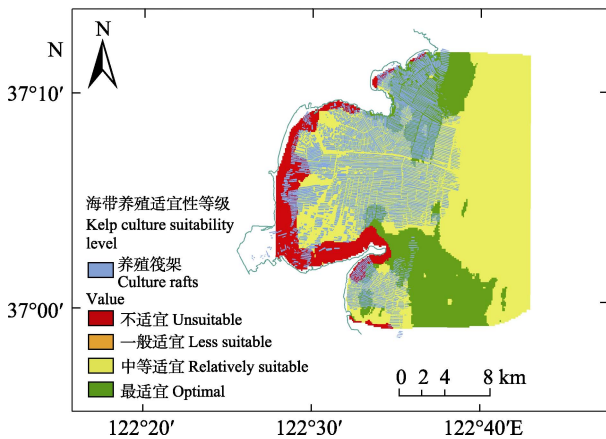


图 6 桑沟湾及周围海域现有养殖状况与适宜性等级
Fig.6 The status quo and suitability level in Sanggou Bay and surrounding waters

6 km²的筏架处于不适宜区, 19.8 km²的筏架处于最适区。从遥感影像显示, 约 62.7 km²的最适宜区域并未安置养殖筏架(图 6)。实际养殖中, 楮岛东部海域最适宜区域海带长度约为 4 m, 而楮岛近岸不适宜养殖区的海带长度最多长到 3 m。

3 讨论

现有养殖布局(图 6)显示, 桑沟湾及其周围海域的养殖已经达到一定的规模, 生产面临挑战。通过对海带适宜性评价, 确定海带最适宜的养殖区域, 以期获得最佳的养殖结果, 同时, 可缓解现有的养殖压力。适宜性评价关键在于环境因素评分的设定, 已有的评分方法多采用经验打分和等间距打分(Radiarta *et al.*, 2008), 使得评分结果主观性较大。Gentry 等(2017)利用生理、异速生长和生长理论的方法, 以多物种 GPI 值(Growth performance index)作为一个养殖生长适宜性的评价标准, GPI 值由 von Bertalanffy 生长方程(Froehlich *et al.*, 2016)和具体养殖品种参数求得, 高的 GPI 值视为有更好的生长条件, 对水产养殖潜力进

行了宏观评估。本研究针对桑沟湾及周围海域具体的养殖品种进行适宜性评价, 采用影响海带生长的经验公式作为评分曲线, 能较好地反映出海带生长对各环境因素的需求范围, 且通过评分曲线, 各环境因素实测值都有与之对应的评分, 评分结果较为科学。

海带养殖对季节依赖性较强, 4 个季节适宜性有较大的差异。春季高分区呈块状分布可能由于春季海带生长较快, 海区无机氮浓度处于一年当中最低值, 因此, 高分值区分散在无机氮较为充足的区域。夏季最适宜面积大于春季、秋季和冬季, 可能由于夏季降水多, 陆源输送使得海区无机氮得到补充, 且此时部分海带已收割, 海带自身的阻流作用减弱, 水交换较好, 处于比较适宜的环境状态。秋季适宜性评分较高的区域主要分布在桑沟湾湾外、爱莲湾和楮岛东部海域附近, 此时, 海表面光强比较平均, 相对于湾内, 湾外水交换较快, 无机氮可得到及时补充, 且水温比较适宜, 所以更适宜海带生长。冬季适宜性评分较高的区域逐渐向近岸处迁移, 数据模拟显示(Xuan *et al.*, 2016), 由于冬季水温较低, 靠近湾内水温相对较高, 适宜海带生长, 且冬季湾外风浪大, 风浪搅动水底泥沙, 实测数据显示, 冬季水体透明度降低, 影响海带受光, 不适宜海带生长(平仲良, 1993)。

适宜性评价中, 采用海带生长 DEB 模型——STELLA 模型进行敏感性分析, 结果显示, 盐度的敏感度大于温度和无机氮(蔡碧莹等, 2019)。虽然, 在养殖环境中, 水体盐度发生改变会对海带生长产生较大的影响, 但桑沟湾没有大型河流汇入, 多年平均降雨量处于中等水平, 盐度的年变化较小, 基本处于适宜海带生长的盐度范围, 且桑沟湾及周围海域盐度强制函数 $f(S)=0.91\sim 0.96$ (蔡碧莹等, 2019), 相较温度和无机氮, 盐度对海带生长限制较小。敏感性分析虽未涉及流速参数, 但由于水动力影响湾内外水交换和无机氮的输送, 水交换带动营养盐补充(史洁等, 2010), 所以, 流速较无机氮对海带生长影响更大, 此外, 温度影响海水流动(冯士箨等, 1999), 因而影响海带生长的环境因子重要性依次为光照>温度>流速>无机氮>盐度。

根据实际生产结果, 海带养殖适宜性评价结果得到了验证, 证明该评价结果较为科学。在北部爱莲湾海域, 浅水区水温较高, 水温升高导致海带腐烂, 海带长度最多长到 3 m; 位于最适宜海区海带长度可达 4 m 左右。楮岛近岸海域周围(水深<5 m 的红色区域), 由于受到水深限制, 海带长度<3m, 达不到一般正常尺寸(4 m), 不适宜安排海带养殖。对于湾外水深超过 30 m 的区域, 虽然, 从适宜性评价结果上属于最

适宜或中等适宜,但实际海带养殖方面,由于风浪较大,养殖设施损失较大,从经济利益角度考虑并不适宜安排海带养殖。楮岛东部海域附近有大面积的海域属于最适宜养殖,但该区域养殖筏架主要集中在近岸,离岸较近海域养殖易受沿岸人类活动影响,因此,可适当将海带养殖筏架后移。

4 结论

本研究通过适宜性评价对桑沟湾及周围海域海带养殖的适宜性进行了评分,划分出不同的适宜性等级。结果表明,适宜性评分较高的区域位于爱莲湾及楮岛东部海域周围,评分较低的区域分布在近岸水深较浅的区域(水深<5 m)。评价结果显示了桑沟湾及周围海域海带养殖区适宜性分布,可根据适宜性评价结果调整现有的养殖布局,将海带养殖区优先安排在海带生长最适宜区或适宜性评分较高的海区。

GIS 作为有效的适宜性评价工具,可将海域时间和空间上非连续的环境参数,可视化的反映其空间分布特征,并简化数据计算和多图层叠加过程,增加了评价结果的精确性和科学性。对于一片养殖水域进行适宜性评价,需要综合考虑养殖过程涉及到的各个方面,例如养殖品种的生长状况、养殖活动对生态环境的影响、养殖产量及利润的评估,养殖风险的预测分析等。这些模型的结合使水产养殖适宜性综合评价更为全面,所呈现出的评价结果更科学合理,可对养殖场选址提出建议,为决策者和利益相关者提供参考,有助于我国开展基于生态系统的水产养殖空间规划以及可持续的水产养殖管理工作。

参 考 文 献

- Barr NG, Kloeppel A, Rees TAV, *et al.* Wave surge increases rates of growth and nutrient uptake in the green seaweed *Ulva pertusa* maintained at low bulk flow velocities. *Aquatic Biology*, 2008, 3(2): 179–186
- Cai BY, Zhu CB, Liu H, *et al.* Model simulated growth of kelp *Saccharina japonica* in Sanggou Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(3): 31–41 [蔡碧莹, 朱长波, 刘慧, 等. 桑沟湾海带生长的模型预测. *渔业科学进展*, 2019, 40(3): 31–41]
- Chen GL, Wang DS. Experience in pilot production management of kelp farming. *China Fisheries*, 1958(4): 10 [陈根禄, 王东室. 海带养殖试点生产管理中的几点体会. *中国水产*, 1958(4): 10]
- Chen DY, Wang JX. Observation of the relationship between the growth and water temperature of kelp in southern Zhejiang. *Zhejiang Agricultural Science*, 1964(2): 89–93 [陈达义, 汪进兴. 海带在浙南沿海生长发育与水温关系的观察. *浙江农业科学*, 1964(2): 89–93]
- Duarte P, Meneses R, Hawkins AJS, *et al.* Mathematical modelling to assess the carrying capacity for multi-species culture within coastal waters. *Ecological Modelling*, 2003, 168(1–2): 109–143
- EPA (Environmental Protection Agency, USA). Rates, constants, and kinetics. Formulations in surface water quality modeling: 2nd Edition, 1985, 455
- Fang JG, Sun HL, Kuang SH, *et al.* Assessing the carrying capacity of Sanggou Bay for culture of kelp *Laminaria japonica*. *Marine Fisheries Research*, 1996(2): 7–17 [方建光, 孙慧玲, 匡世焕, 等. 桑沟湾海带养殖容量的研究. *海洋水产研究*, 1996(2): 7–17]
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Ninth session FAO COFI sub-committee on aquaculture, Rome, 2017, <http://www.fao.org/fishery/aquaculture/en>
- Feng SZ, Li FQ, Li SJ. Introduction to ocean science. Beijing: High Education Press, 1999 [冯士筭, 李凤歧, 李少菁. 海洋科学导论. 北京: 高等教育出版社, 1999]
- Foresman TW. The history of geographic information system perspectives from the pioneers. Englewood: Prentice Hall PTR, 1998
- Froehlich HE, Gentry RR, Halpern BS. Synthesis and comparative analysis of physiological tolerance and life-history growth traits in marine aquaculture species. *Aquaculture*, 2016, 460: 75–82
- Gentry RR, Halley EF, Grimm D, *et al.* Mapping the global potential for marine aquaculture. *Nature Ecology and Evolution*, 2017, 1(9): 1317–1324
- Harlin MM. Nitrate uptake by *Enteromorpha* spp. (Chlorophyceae): Application to aquaculture systems. *Aquaculture*, 1978, 15(4): 373–376
- Kitadai Y, Kadowaki S. The growth process and N, P uptake rates of *Laminaria japonica* cultured in coastal fish farms. *Aquaculture Science*, 2003, 51(1): 15–23
- Leigh EG, Paine RT, Quinn JF, *et al.* Wave energy and intertidal productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1987, 84(5): 1314–1318
- Liu H, Cai BY. Advance in research and application on aquaculture carrying capacity. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(3): 158–166 [刘慧, 蔡碧莹. 水产养殖容量研究进展及应用. *渔业科学进展*, 2018, 39(3): 158–166]
- Lobban CS, Harrison PJ. Seaweed ecology and physiology. Cambridge: Cambridge University Press, 1996
- Lobban CS, Harrison PJ. Seaweed ecology and physiology. Cambridge: Cambridge University Press, 1994, 123–162
- Malczewski J. On the use of weighted linear combination method in GIS: Common and best practice approach. *Transaction in GIS*, 2000, 4(1): 5–22
- Martins I, Marques JC. A model for the growth of opportunistic

- macroalgae (*Enteromorpha* sp.) in tidal estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 55(2): 247–257
- Ottinger M, Clauss K, Kuenzer C. Aquaculture: Relevance, distribution, impacts and spatial assessments – A review. *Ocean and Coastal Management*, 2016, 119: 244–266
- Ping ZL. Calculating the suspended matter content in the Yellow Sea with the seawater transparency data and NOAA satellite data. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, 24(1): 24–30, 118 [平仲良. 用实测海水透明度数据和 NOAA 卫星数据计算黄海悬浮体含量. *海洋与湖沼*, 1993, 24(1): 24–30, 118]
- Radiarta IN, Saitoh SI, Miyazono A. GIS-based multi-criteria evaluation models for identifying suitable sites for Japanese scallop (*Mizuhopecten yessoensis*) aquaculture in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan. *Aquaculture*, 2008, 284(1–4): 127–135
- Saaty TL. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 1977, 15(3): 234–281
- Shi J, Wei H, Zhao L, *et al.* Study on ecosystem model of multi-species culture in Sanggou Bay: II Simulation of ecosystem and the circulation of nutrients. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(4): 36–42 [史洁, 魏皓, 赵亮, 等. 桑沟湾多元养殖生态模型研究: II 生态环境模拟与生源要素循环. *渔业科学进展*, 2010, 31(4): 36–42]
- Shi J. Numerical study on the influences of physical processes on the aquaculture carrying capacity in a semi-enclosed bay. Doctoral Dissertation of Ocean University of China, 2009 [史洁. 物理过程对半封闭海湾养殖容量影响的数值研究. 中国海洋大学博士研究生学位论文, 2009]
- Steele JH. Environmental control of photosynthesis in the sea. *Limnology and Oceanography*, 1962, 7(2): 137–150
- Suzuki S, Furuya K, Kawai T, *et al.* Effect of seawater temperature on the productivity of *Laminaria japonica* in the Uwa Sea, southern Japan. *Journal of Applied Phycology*, 2008, 20(5): 833–844
- Wang X, Li WQ. Effects of salinity and pH on photosynthesis rate of marine algae. *Marine Environmental Science*, 1991, 10(1): 37–40 [王宪, 李文权. 盐度、pH 对海洋藻类光合作用速率的影响. *海洋环境科学*, 1991, 10(1): 37–40]
- Wheeler WN. Effect of boundary layer transport on the fixation of carbon by the giant kelp *Macrocystis pyrifera*. *Marine Biology*, 1980, 56(2): 103–110
- Wu RJ, Zhang XL, Zhu MY, *et al.* A model for the growth of Haidai (*Laminaria japonica*) in aquaculture. *Marine Science Bulletin*, 2009, 28(2): 34–40 [吴荣军, 张学雷, 朱明远, 等. 养殖海带的生长模型研究. *海洋通报*, 2009, 28(2): 34–40]
- Xuan JL, Yang ZQ, Huang DJ, *et al.* Tidal residual current and its role in the mean flow on the Changjiang bank. *Journal of Marine Systems* 2016, 154: 66–81
- Zhang DM, Liao GR, Yang QM. Research on the relationship between the coastal current and *Laminaria japonica* raising II. An experiment of comparison between the current speed and *Laminaria japonica* growth. *Journal of Shandong College of Oceanology*, 1982, 12(3): 73–79 [张定民, 缪国荣, 杨清明. 沿岸流与海带养殖关系的研究 II. 流速对海带生长的影响. *山东海洋学院学报*, 1982, 12(3): 73–79]
- Zhang ZH, Lv JB, Ye SF, *et al.* Values of marine ecosystem services in Sanggou Bay. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2540–2547 [张朝晖, 吕吉斌, 叶属峰, 等. 桑沟湾海洋生态系统的服务价值. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2540–2547]

(编辑 马瑾艳)

GIS-Based Assessment for Culture Suitability of Kelp (*Saccharina japonica*) in Sanggou Bay and the Surrounding Waters

SUN Qianwen^{1,2}, LIU Hui^{2①}, SHANG Weitao^{3,4}, YU Liangju⁴,
JIANG Xiaopeng^{3,4}, CAI Biying^{1,2}, CHANG Lirong⁵, XIAO Luyang⁵

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306;

2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 4. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003;

5. Weihai Changqing Ocean Science & Technology Co., Ltd, Rongcheng 264316)

Abstract With the expansion of aquaculture, there is an increasing concern regarding issues such as conflicts with multi-sea use, low productivity, and higher economic costs. The selection of suitable sites for aquaculture is essential for utilization of sea space and improvement of the efficiency and profits of aquaculture industry. Kelp (*Saccharina japonica*) is the main culture species in Sanggou Bay and the surrounding waters. The assessment of suitability for kelp culture has been conducted with factors, including light intensity, water temperature, velocity, dissolved inorganic nitrogen, salinity, and depth. The remote sensing is employed to obtain the information of the existing culture areas. The environment variables were collected from field surveys along with model simulations. The Dynamic Energy Budget (DEB) model–STELLA model coupled with analytic hierarchy process was applied to calculate weighted-sums of scores for suitability evaluation. The result showed that the suitability scores were 0~6.7 with the main distribution range of 4~6. 23% of area was estimated to be the most suitable for kelp culture, whereas 10% of total study area was not suitable. The high score areas are mainly located in Ailian Bay and Chudao eastern surrounding waters, whereas the low score areas are mainly located in the shallow waters near the shore. The results have provided a guideline to help in site selection and in the management of kelp culture.

Key words Aquaculture; Suitability assessment; Site selection; GIS

① Corresponding author: LIU Hui, E-mail: liuhui@ysfri.ac.cn