

引用格式:侯娟,周为峰,王鲁民,等.中国深远海养殖潜力的空间分析[J].资源科学,2020,42(7):1325-1337. [Hou J, Zhou W F, Wang L M, et al. Spatial analysis of the potential of deep-sea aquaculture in China[J]. Resources Science, 2020, 42(7): 1325-1337.] DOI: 10.18402/resci.2020.07.09

中国深远海养殖潜力的空间分析

侯娟^{1,2},周为峰¹,王鲁民¹,樊伟^{1,3},原作辉^{2,3}

(1. 中国水产科学研究院东海水产研究所,上海 200090;2. 上海海洋大学海洋科学学院,上海 201306;3. 中国水产科学研究院渔业资源遥感信息技术重点实验室,上海 200090)

摘要:海洋养殖在保障国家粮食安全和营养方面具有非常重要的作用。拓展海水养殖新空间对中国近海生态环境的改善、食物安全的保障、海洋资源的有效利用和海洋主权的宣誓有着重要意义。本文以180种海水养殖物种(鱼类120种、双壳类60种)为分析对象,通过各物种生长耐温范围和研究区域海表温度的匹配和比较,计算空间地理格网上多物种生长潜力指数的平均值,分别得到鱼类和双壳类养殖潜力,并基于阈值法对离岸距离和深度等条件进行约束,定量分析中国深远海养殖潜力的空间分布。结果表明:①在满足评估条件的区域内,对于鱼类,渤海(BYS)、东海(ECS)和南海(SCS)海区适宜面积分别约为19.98、76.29、81.69万km²;对于双壳类,渤海、东海和南海海区适宜面积分别约为3.02、4.17、2.03万km²;②按照海区划分时,可优先考虑东海和南海进行鱼类养殖,而渤海鱼类养殖潜力值变化最大,未来鱼类养殖需要更细致地规划选址,以尽可能选择潜力值较大的区域;双壳类养殖可优先选择南海;③按照海域深度划分时,鱼类可优先考虑深度较深的海域进行远海养殖,而双壳类适宜离岸较近、深度较浅的海域。根据潜力评价结果可进行海域空间规划,为管理部门和养殖企业提供参考。

关键词:深远海养殖;养殖潜力;空间分析;鱼类;双壳类;中国

DOI: 10.18402/resci.2020.07.09

1 引言

除了海洋捕捞,人类通过养殖向海洋主动、定向索取生物资源以获得优质的蛋白质^[1]。目前,中国海水养殖主要集中在陆基和水深20 m以内的近浅海区域,不仅养殖空间受到严重限制,而且密度过大、病害频发、环境恶化等问题日益突出。为了保护近海生态环境、实现海水养殖产业的可持续发展,拓展养殖新空间迫在眉睫。在远离陆基且水深20 m以下的海域进行养殖作业^[2-4]的深远海养殖,不仅可以有效缓解近海生态压力,而且有利于加快实现中国渔业现代化,更好地发展海洋经济和建设海洋强国。

深远海养殖是以养殖平台、养殖技术和养殖物

种为主体的综合体系和系统工程,还处于起步发展阶段^[5]。国内外学者对发展战略^[6,7]和养殖平台^[8-11]进行了一些探讨,对深水网箱^[12-15]和养殖工船^[16-18]等装备以及自动投饵^[19-22]、网衣清洗^[23,24]、鱼类起捕^[25-27]等养殖技术开展了研究。国内学者^[28,29]从成本与收益等经济学角度对养殖物种的经济潜力进行了探讨。总体上,养殖物种及物种养殖潜力方面的研究仍处于探索阶段。深远海养殖物种的选择需从经济学和物种生物学特性两方面考虑^[5],养殖物种应对深远海环境具有一定适应性。生物学上通常用物种生长潜力指数(Growth Performance Index, GPI)评估物种的生长适应性,该指数由物种渐近体长和生长速率计算得到,是衡量物种生长潜力的一

收稿日期:2019-11-29;修订日期:2020-03-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD0901405);国家自然科学基金项目(31602206);上海市自然科学基金项目(16ZR1444700)。

作者简介:侯娟,女,山西吕梁人,硕士研究生,主要研究方向为渔业GIS应用。E-mail: houjj333@163.com

通讯作者:周为峰,女,江苏高邮人,副研究员,博士,主要研究方向为渔业遥感与渔场海洋学。E-mail: zhwfzhwf@163.com

个度量^[30-32]。国外学者 Gentry 等^[33]应用 GPI 对全球 200 m 深度内海域的海水养殖潜力进行了量化估计。而中国现有研究仅对深远水养殖的环境适宜性进行了定性分析^[1], 基于物种生物学特性的深远海养殖潜力相关研究亟待开展。

因此, 本文将养殖潜力定义为海域范围内空间地理格网上潜在养殖物种 GPI 的平均值, 通过生物学特性和深远海海洋环境的耦合, 对中国深远海养殖潜力的空间分布进行量化分析。首先将物种耐受温度范围和海表温度范围基于格网进行匹配和比较, 将 120 种鱼类和 60 种双壳类映射到适宜生长的地理位置, 然后进一步计算地理格网点上多物种 GPI 平均值, 分别得到鱼类和双壳类的深远海养殖潜力, 最后从不同海区 and 深度等级等角度分析养殖

潜力在空间上的分布, 以期对深远海养殖的科学规划和空间布局提供参考。

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

2.1.1 数据来源

基于 FAO2013 年海水养殖数据集, 采用 Froehlich 等^[34]所选用的 180 种海水养殖物种 (120 种鱼类和 60 种双壳类) 作为分析对象, 包含目前尚未在中国海域进行养殖的潜在养殖物种, 表 1 为部分物种列举。所选海水养殖物种可以归纳为两种水产养殖类型, 鱼类代表饲养水产养殖类型, 双壳类代表营养来自环境的水产养殖类型。所用数据集^[34]包括物种名、耐受最高温、耐受最低温以及两个生长参数 (渐进体长 L_{∞} 和生长速率 K)。

表 1 120 种鱼类和 60 种双壳类数据集

Table 1 Data sets for 120 species of fish and 60 species of bivalves

种类	拉丁学名	中文学名	耐受最低温/°C	耐受最高温/°C	渐进体长/cm	生长速率
鱼类(120种)	<i>Larimichthys crocea</i>	大黄鱼	9.0	30.0	80.0	0.32
	<i>Rachycentron canadum</i>	军曹鱼	26.0	32.0	152.8	0.33
	<i>Sciaenops ocellatus</i>	美国红鱼	9.6	26.0	104.5	0.40
	<i>Seriola quinqueradiata</i>	鲷鱼	18.0	29.0	150.0	0.44
	<i>Red (Japanese) seabream</i>	真鲷	7.7	22.0	100.0	0.15
	<i>Lateolabrax japonicus</i>	鲈鱼	13.0	23.0	25.0	0.18
	<i>Mugil cephalus</i>	鲻, 鲻鱼	8.0	24.0	71.2	0.29
	<i>Panalichthys olivaceus</i>	鲆鱼(大菱鲆)	8.6	25.0	103.0	0.20
	<i>Trachinotus blochii</i>	鲷鲈	20.0	31.0	96.7	0.56
	...					
双壳类(60种)	<i>Argopecten purpuratus</i>	秘鲁扇贝	16.0	20.0	12.0	2.32
	<i>Argopecten ventricosus</i>	太平洋扇贝	20.0	29.0	17.5	0.60
	<i>Aulacomya ater</i>	Cholga 贻贝	0.0	25.6	6.3	0.35
	<i>Crassostrea gigas</i>	太平洋牡蛎	15.0	30.0	45.0	1.15
	<i>Mytilus chilensis</i>	智利贻贝	12.0	16.0	10.2	0.50
	<i>Mytilus coruscus</i>	韩国贻贝	2.9	20.0	10.0	0.21
	<i>Mytilus edulis</i>	蓝贻贝	-1.4	23.4	11.0	0.31
	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	地中海贻贝	7.6	9.0	15.0	0.58
	<i>Mytilus planulatus</i>	澳大利亚贻贝	12.3	21.3	6.0	0.46
	<i>Pecten fumatus</i>	澳大利亚扇贝	12.0	21.0	8.6	1.60
	<i>Pecten maximus</i>	大西洋扇贝	7.9	15.9	17.0	0.56
	<i>Perna canaliculus</i>	新西兰贻贝	18.2	18.2	15.0	0.60
	...					

2020年7月

海洋环境数据选用海表温度(Sea Surface Temperature, SST)、叶绿素 a 浓度(Chlorophyll-a, Chl-a)和深度(Depth)。数据均来源于美国国家海洋和大气局 NOAA 下属的 Ocean Watch 网站(<https://oceanwatch.pifsc.noaa.gov>),其中,SST 和 Chl-a 时间分辨率为月,跨度为 2008—2017 年共 10 年,SST 空间分辨率为 $1/24^\circ \times 1/24^\circ$ (约 4 km), Chl-a 空间分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$, Depth 空间分辨率为 $0.016^\circ \times 0.016^\circ$,将数据分辨率统一为 $0.016^\circ \times 0.016^\circ$ 。

同时研究需考虑排除限制养殖的海洋保护区。海洋保护区数据来源于世界保护区数据库(<https://www.protectedplanet.net/c/world-database-on-protected-areas>)。

本文以中国管辖海域为研究区。为便于研究计算,将海域根据地理划定和海温分布^[35]划分为 3 个海区,分别称为:渤、黄海(BYS),东海(ECS)和南海(SCS),其中(117.5°E — 127.0°E , 35.0°N — 41.0°N)代表渤海, (120.0°E — 130.0°E , 22.0°N — 35.0°N)代表东海, (108.0°E — 120.0°E , 3.4°N — 25.5°N)代表南海,如图 1 所示。

2.1.2 数据预处理

对海表温度 SST 和叶绿素 Chl-a 浓度数据进行

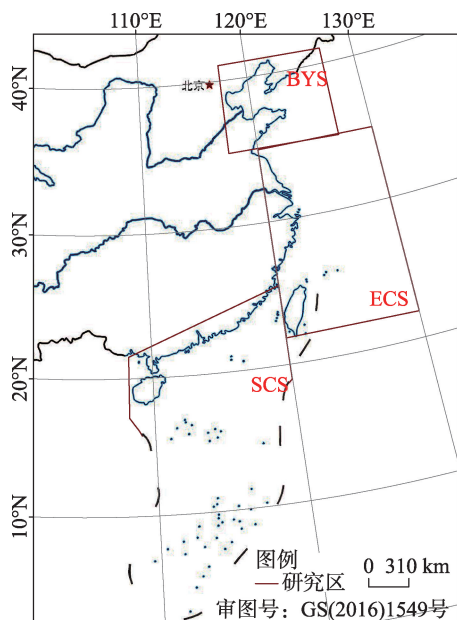


图 1 研究区域(BYS:渤、黄海,ECS:东海,SCS:南海)

Figure 1 The study area (BYS: Bohai and Yellow Sea; ECS: East China Sea; SCS: South China Sea)

预处理,按年度提取年度 SST 最高值、年度 SST 最低值;计算月平均 Chl-a 浓度、年平均 Chl-a 浓度。

2.2 技术路线图

本文采用 R 语言实现海表温度和叶绿素数据的预处理,在 Excel 中进行 120 种鱼类和 60 种双壳类各物种 GPI 的计算;在 RStudio 中,通过海表温度范围(年度 SST 最高值、年度 SST 最低值)与物种生长耐温范围的比较,完成物种与地理位置的匹配;计算各地理格网上鱼类 GPI 平均值和双壳类 GPI 平均值,并基于阈值法使用深度、海洋保护区等条件进行约束,将不符合养殖评估条件的区域进行裁剪;最后运用 ArcGIS 软件进行符号化及可视化显示。技术路线如下图 2 所示。

2.3 研究方法

2.3.1 物种生长潜力指数 GPI 的计算

本文以空间格网上潜在养殖物种的生长潜力指数 GPI 的平均值作为该地理位置上的养殖潜力的表征指标。物种生长潜力指数 GPI 是由物种特定生长参数(渐近体长和生长速率)计算得到的用以表示和比较物种生长潜力的无量纲指标^[32]。GPI 通常在 0~5 之间,大多数水产养殖鱼类的 GPI 值高于 2,双壳类 GPI 值高于 1^[30,31]。GPI 经常用于评估物种的生长适应性,特别适用于饲养物种(鱼类)或食物不受限制的物种(双壳类)^[30-32]。在特定区域,多物种平均 GPI 值越高,表征多物种在该区域生长适应性越好,其养殖生产潜力也越高。计算公式如下:

$$GPI = \log_{10} K + 2 \log_{10} L_{\infty} \quad (1)$$

式中: GPI 表示物种生长潜力指数, L_{∞} 表示渐近体长(最大体长), K 表示生长速率。 GPI 可以理解为,当生长速率相同,物种渐进体长越大则越适宜进行经济养殖;同样当渐进体长相同时,生长速率越快则越适宜进行经济养殖。 L_{∞} 和 K 源自于 Von Bertalanffy 生长方程(VBGF),该方程揭示了鱼类的生长特性,经常用于资源评估研究^[34,36]。

2.3.2 地理格网上物种养殖潜力的确定

分别确定地理格网上鱼类和双壳类养殖潜力。

地理格网上鱼类养殖潜力的确定:①按年度,将 120 种鱼各种类的耐温范围(耐受最高温、耐受最低温)与地理格网温度范围(年度 SST 最高值、年度

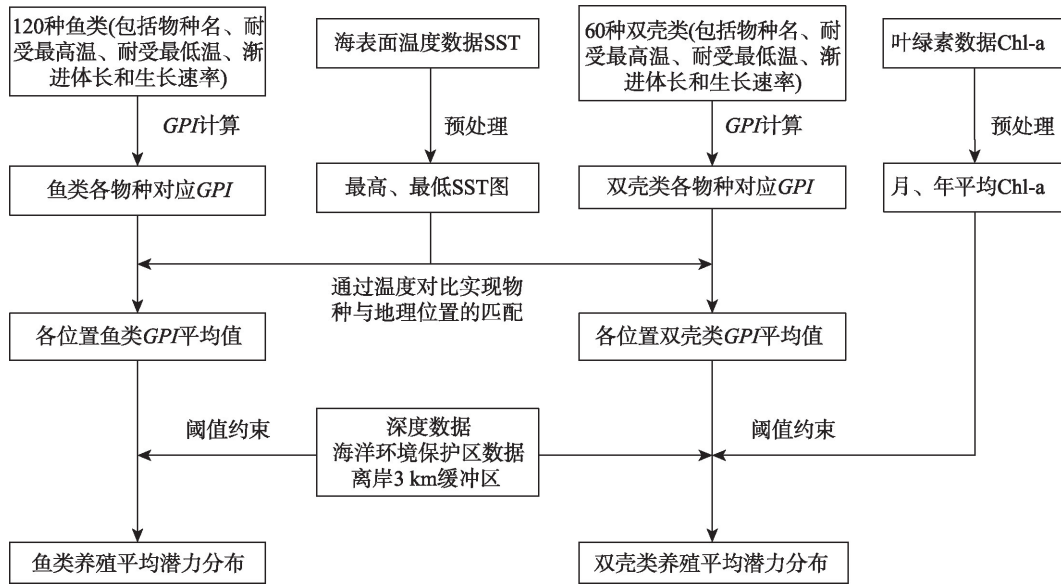


图2 研究技术路线图

Figure 2 Flow chart of the technological methods

SST最低值)匹配和比较^[33],将鱼的种类匹配映射到适宜其生长的地理格网。这样一个格网上会匹配若干个不同的鱼种,每个种类对应有一个GPI;②然后计算该年度各格网单元上的多物种GPI平均值;③计算2008—2017年地理格网上各年度多物种GPI平均值的多年平均值,即为该格网单元的鱼类平均养殖潜力。为便于描述,用 \overline{GPI} 来表示地理格网多物种GPI的平均值,即该格网养殖潜力。匹配需同时满足如下条件:

$$\begin{aligned} temp. \min_{N_k} &\leq t. \min_{(i,j)} \\ temp. \max_{N_k} &\geq t. \max_{(i,j)} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $temp. \min_{N_k}$ 和 $temp. \max_{N_k}$ 分别表示鱼类物种 N_k ($k=1, 2, \dots, 120$) 耐受最低温和耐受最高温, $t. \min_{(i,j)}$ 和 $t. \max_{(i,j)}$ 分别表示第 i 行、第 j 列格网的年度最低 SST 和最高 SST。即当物种 N_k 耐受最低温低于 (i, j) 格网年度最低 SST, 同时耐受最高温高于 (i, j) 格网年度最高 SST 时, 则将 N_k 物种 GPI 值赋给 (i, j) 格网。

地理格网上双壳类养殖潜力的确定方法同鱼类。

2.3.3 基于阈值法的条件约束

地理格网物种养殖潜力的评估需要排除限制水产养殖发展的区域。对于鱼类, 只保留深度、离

岸距离、海洋保护区适宜阈值范围内区域; 而对于双壳类, 除了深度、离岸距离、海洋保护区约束条件外, 还要考虑叶绿素 a 浓度对双壳类养殖的影响。

根据王鲁民^[37]提出的符合中国国情的深远海定义, 本文从养殖角度实验性地将深度定位在 20~2000 m, 离岸距离定位在大于 3 km; 同时将深度数据以 40、60、80、100、200、1000 m 为节点划分为 7 类。双壳类养殖需要足够的天然食物供应来促进生长, 本文考虑将双壳类水产养殖区域限制在年平均 Chl-a 浓度不少于 2 mg/m^3 , 同时月平均 Chl-a 浓度大于 1 mg/m^3 能至少保持 10 个月的区域之内^[33]。

此外, 在结果分析中, 本文将鱼类养殖潜力低于 2 的海域, 双壳类养殖潜力低于 1 的海域作剔除处理, 这些海域均不能保持足够的水温供水产养殖^[33], 因而将其视为不适宜养殖海域进行阈值约束。

2.3.4 自然间断点分级法

自然间断点分级法基于数据本身特点进行间断分组, 达到组间方差最大、组内方差最小则停止聚类^[38,39], 是地理数据分类研究中常用的分级方法。本文以自然间断点分级法三分类断点为界, 分别将适宜鱼类和双壳类养殖的区域分为高潜力区、中等潜力区和低潜力区 3 种级别。

2020年7月

3 结果与分析

3.1 物种生长潜力 GPI 值分布

由图3可知,本文所选择的120种鱼类中, GPI 值基本都大于2,最大值达到4.61,均值为3.28;对于60种双壳类, GPI 值基本都大于1,最大值为3.45,均值为1.96。 GPI 是根据物种渐进体长和生长速率计算得来,而鱼类渐近体长总体大于双壳类,因而使得鱼类的 GPI 较高。鱼类和双壳类 GPI 基本呈正态分布。

3.2 鱼类和双壳类的养殖潜力分布

图4为鱼类养殖潜力分布直方图,由于各区间频数存在数量级的变化,为了清楚地表示不同 \overline{GPI} 区间的频数分布,采用半对数坐标系进行显示。鱼类养殖潜力在3.4~3.5区间频数最多,三分类间断点为3.01和3.36,均值为3.42。图5为双壳类养殖潜力分布直方图,潜力在1.45~1.50区间频数最多,三分类间断点为1.34和1.76,潜力均值为1.49。本文以三分类间断点为界分别将鱼类和双壳类养殖潜力分为高、中、低3类,并运用ArcGIS可视化显示(图6和图7)。

由图6可知,从空间大尺度来看,BYS、ECS和SCS海区均有大片符合深远海养殖条件的海域供鱼类养殖,鱼类低潜力区主要零散分布在BYS海区北部,中等潜力区主要分布在ECS海区,高潜力区在3个海区均有大片分布。由图7可知,双壳类适宜养殖区覆盖面积相较鱼类要少很多,低潜力区零散分布在BYS和ECS海区,中等潜力区主要在ECS海区,高潜力区主要集中分布在SCS海区。由此可见,中国深远海鱼类养殖发展空间较大,而双壳类深远海养殖可优先考虑布局在南海海区。

3.3 根据海区划分的养殖潜力分布

图8为各海区鱼类养殖潜力频数分布图,BYS海区存在 \overline{GPI} 大于3.6的高潜力格网,潜力取值范围最大;BYS和ECS海区存在 \overline{GPI} 值为2~3的低潜力格网,且BYS海区多于ECS海区;而SCS海区 \overline{GPI} 值集中分布在3.1~3.6,均为中、高潜力格网;3个海区鱼类 \overline{GPI} 值在3.4~3.5区间出现峰值,表明各海区均有大片鱼类养殖高生产潜力区域,深远海鱼类养殖可优先考虑布局SCS海区,而BYS海区需

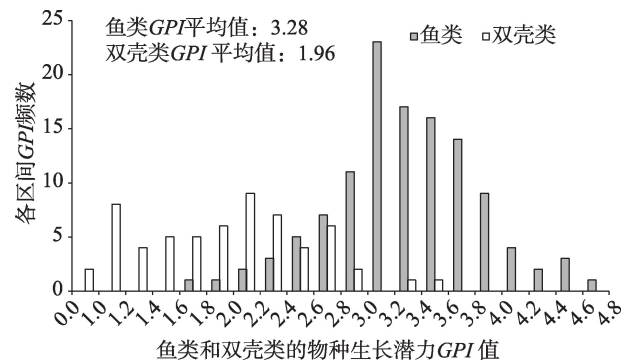


图3 物种生长潜力 GPI 分布

Figure 3 Species growth performance index (GPI) value distribution

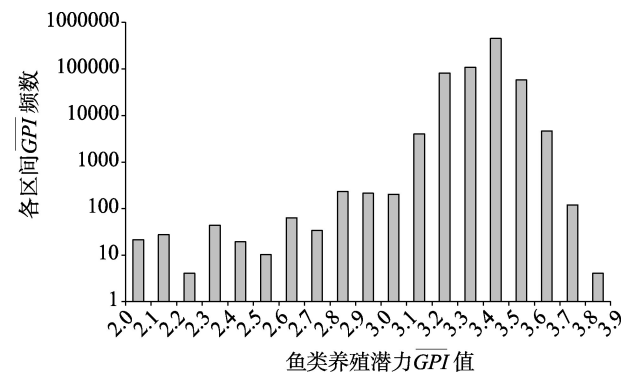


图4 鱼类养殖潜力 \overline{GPI} 频数分布直方图

Figure 4 Fish breeding potential \overline{GPI} frequency distribution histogram

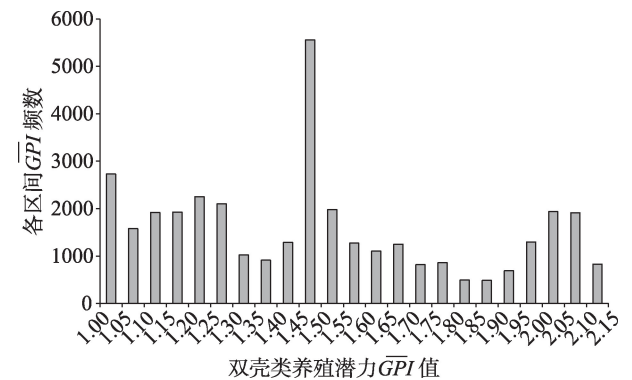


图5 双壳类养殖潜力 \overline{GPI} 频数分布直方图

Figure 5 Bivalves breeding potential \overline{GPI} frequency distribution histogram

要更细致的规划选址以充分利用潜力值较大的区域。

图9为双壳类养殖潜力频数分布图,BYS各 \overline{GPI} 区间分布均匀;ECS海区 \overline{GPI} 值在1.4~1.5区间频数最多,之后随 \overline{GPI} 值增大,格网数呈减少趋势;

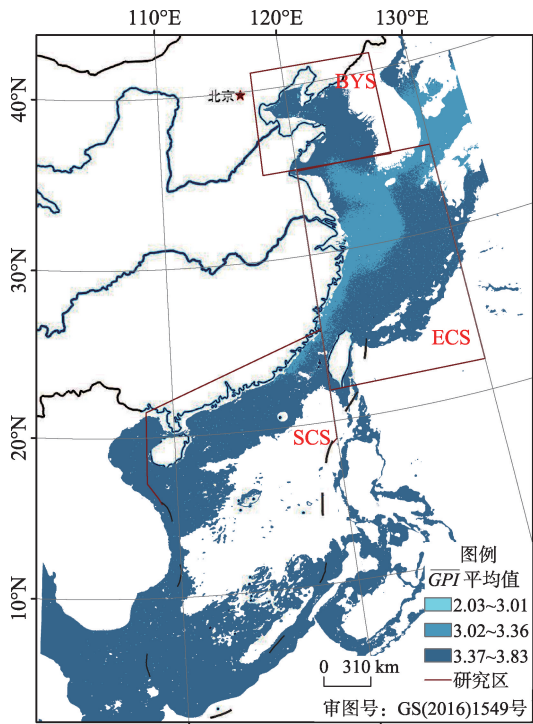


图6 2008—2017年鱼类平均养殖潜力分布图

Figure 6 Fish average breeding potential, 2008-2017

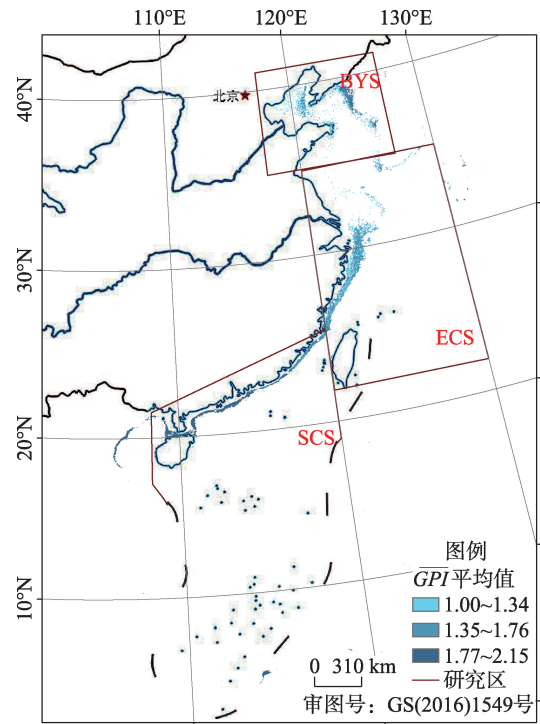


图7 2008—2017年双壳类平均养殖潜力分布图

Figure 7 Bivalves average breeding potential, 2008-2017

而SCS海区随 \overline{GPI} 值增大, 格网数呈增多趋势, 且仅该海区存在 \overline{GPI} 大于2.1的格网, 其高潜力区最多, 因此双壳类养殖可优先选择布局SCS海区。

由表2可知, 在BYS海区, 鱼类养殖低、中、高潜力区域分别占总评估面积的比例为: 0.85%、1.78%、97.37%, 双壳类比例为: 53.03%、32.72%、14.25%; ECS海区, 鱼类养殖低、中、高潜力区域分别占总评估面积的比例为: 0%、38.36%、61.64%, 双壳类比例

为: 42.12%、55.89%、1.98%; SCS海区, 鱼类养殖低、中、高潜力区域分别占总评估面积的比例为: 0%、2.36%、97.64%, 双壳类比例为: 1.46%、19.73%、78.81%。BYS、ECS、SCS各海区适宜鱼类养殖的高潜力区域面积分别约为: 19.46万、47.02万、79.76万 km^2 ; 适宜双壳类养殖的高潜力区域面积分别约为: 0.43万、0.08万、1.60万 km^2 , 可见SCS海区高养殖潜力区域最多。

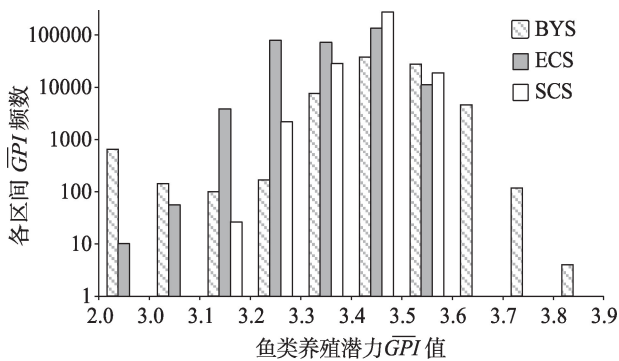


图8 各海区鱼类养殖潜力 \overline{GPI} 频数分布直方图

Figure 8 Fish breeding potential \overline{GPI} frequency distribution histogram in various sea areas

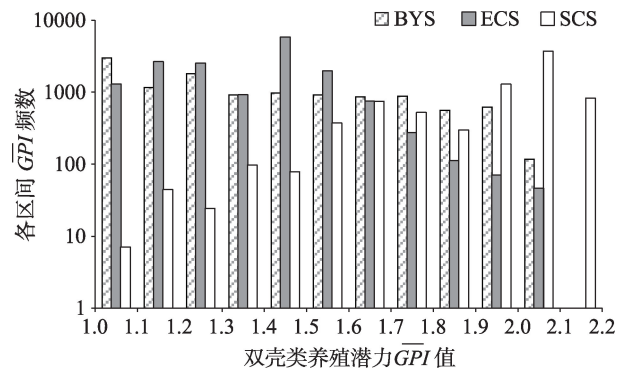


图9 各海区双壳类养殖潜力 \overline{GPI} 频数分布直方图

Figure 9 Bivalves breeding potential \overline{GPI} frequency distribution histogram in various sea areas

表2 各个海区适宜鱼类和双壳类养殖的不同潜力等级的面积统计

Table 2 Statistics of the area of different potential levels suitable for fish and bivalve farming in various sea areas (km²)

物种类型	养殖潜力等级	海区划分			总面积
		BYS	ECS	SCS	
鱼类	低潜力区	1707.52	25.60	0.00	1733.12
	中等潜力区	3555.84	292625.93	19281.92	315463.69
	高潜力区	194567.69	470205.46	797614.11	1462387.26
双壳类	低潜力区	15997.44	17582.08	296.96	33876.48
	中等潜力区	9868.80	23329.28	4011.52	37209.60
	高潜力区	4298.24	826.88	16023.04	21148.16
鱼类总面积		199831.05	762856.99	816896.03	1779584.07
双壳类总面积		30164.48	41738.24	20331.52	92234.24

3.4 根据深度等级划分的养殖潜力分布

图10为各深度海域鱼类养殖潜力频数分布图, 20~40 m深度海域存在 \overline{GPI} 大于3.7的高潜力格网, 潜力取值范围最大; 20~40、40~60和60~80 m深度海域均存在 \overline{GPI} 为2~3的低潜力格网, 且20~40 m深度海域频数大于40~60 m深度海域频数, 60~80 m次之; 其余深度海域鱼类 \overline{GPI} 值分布较集中, 为中、高潜力格网; 不同深度海域 \overline{GPI} 值均在3.4~3.5区间出现峰值, 表明各深度海域均有大片鱼类养殖高生产潜力区域, 可优先选择80 m深度以下海域做鱼类养殖规划考虑, 而对80 m以上海域需要进行细致的规划选址。

图11为各深度海域双壳类养殖潜力频数分布

图, 在20~40 m深度海域各 \overline{GPI} 区间分布相对均匀, 且高潜力格网较多; 40~60 m深度海域, \overline{GPI} 值在1.4~1.5范围内频数最多, 之后随 \overline{GPI} 值增大, 中、高潜力格网频数呈减少趋势; 60~80 m海域, 随 \overline{GPI} 值增大, 频数呈减少趋势。由此表明, 深远海双壳类养殖应优先考虑布局在离岸较近且深度较浅的20~40 m深度海域, 其次为40~60 m和60~80 m深度海域。

由表3可知, 20~40 m深度海域, 鱼类养殖低、中、高潜力区域分别占总评估面积的比例为: 0.70%、20.41%、78.89%, 双壳类比例为: 31.25%、33.90%、34.86%; 40~60 m深度海域, 鱼类养殖低、中、高潜力区域分别占总评估面积的比例为:

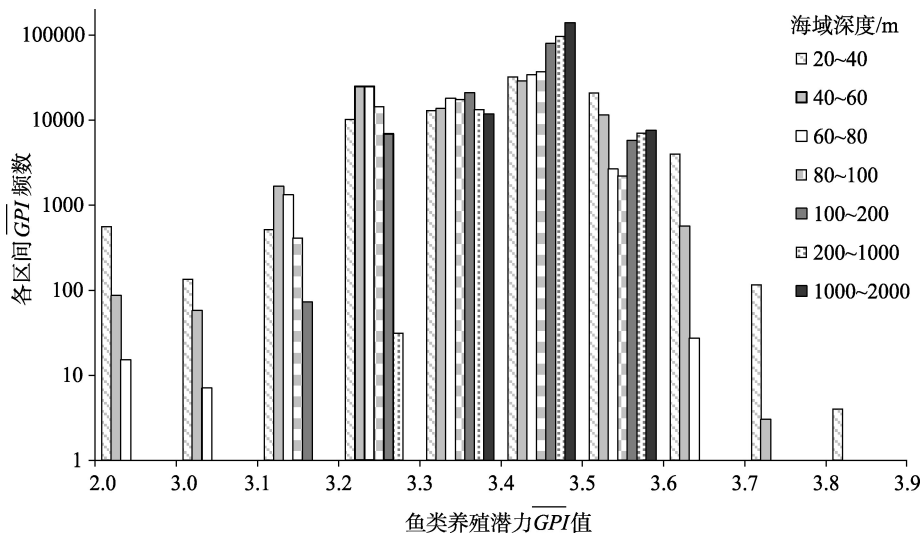


图10 各深度海域鱼类养殖潜力 \overline{GPI} 频数分布直方图

Figure 10 Fish breeding potential \overline{GPI} frequency distribution histogram in various depth classes

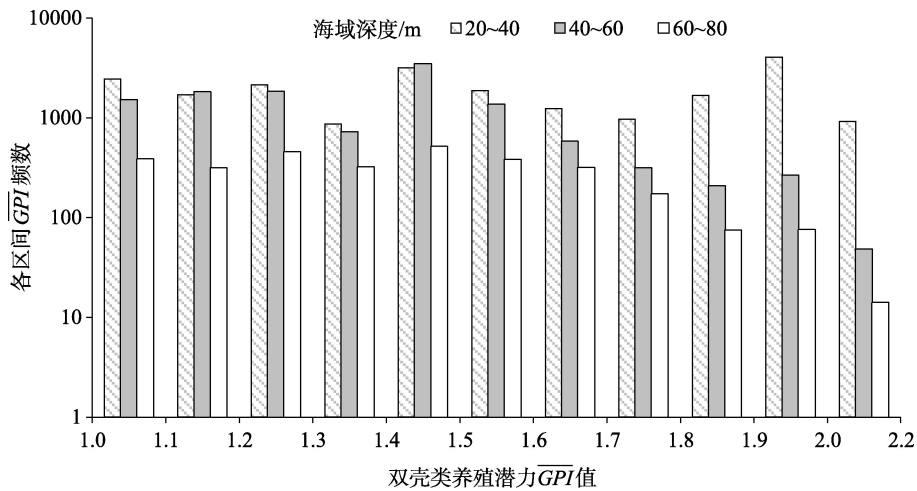


图 11 各深度海域双壳类养殖潜力 \overline{GPI} 频数分布直方图

Figure 11 Bivalves breeding potential \overline{GPI} frequency distribution histogram in various depth classes

表 3 各个深度适宜鱼类和双壳类养殖的不同潜力等级的面积统计

Table 3 Statistics of the area of different potential levels suitable for fish and bivalve farming at various depths (km²)

物种类型	养殖潜力等级	深度/m						总面积	
		20~40	40~60	60~80	80~100	100~200	200~1000		1000~2000
鱼类	低潜力区	1454.08	240.64	38.40	0.00	0.00	0.00	0.00	1986.56
	中等潜力区	42245.12	87946.24	87761.92	55685.12	34270.72	4889.60	2664.96	315463.69
	高潜力区	163264.01	117160.96	117153.30	125977.61	251138.57	291361.29	396331.54	1462387.25
双壳类	低潜力区	16762.88	13908.48	3205.12	0.00	0.00	0.00	0.00	33876.48
	中等潜力区	18183.68	15147.52	3878.40	0.00	0.00	0.00	0.00	37209.60
	高潜力区	18698.24	1840.64	609.28	0.00	0.00	0.00	0.00	21148.16
鱼类总面积		206963.21	205347.85	204953.61	181662.73	285409.29	296250.89	398996.50	1779584.07
双壳总面积		53644.80	30896.64	7692.80	0.00	0.00	0.00	0.00	92234.24

0.12%、42.83%、57.05%，双壳类比例为：45.02%、49.03%、5.96%；60~80 m深度海域，鱼类养殖低、中、高潜力区域分别占总评估面积的比例为：0.02%、42.82%、57.16%，双壳类比例为：41.66%、50.42%、7.92%。适宜鱼类养殖的高潜力区域面积分别约为：20~40 m深度海域 16.33 万 km²，40~60 m深度海域 11.72 万 km²，60~80 m深度海域 11.72 万 km²，80~100 m深度海域 12.60 万 km²，100~200 m深度海域 25.11 万 km²，200~1000 m深度海域 29.14 万 km²和 1000~2000 m深度海域 39.63 万 km²。适宜双壳类养殖的高潜力区域面积分别约为：20~40 m深度海域 1.87 万 km²，40~60 m深度海域 0.18 万 km²，60~80 m

深度海域 0.06 万 km²，深度大于 80 m 的海域不适宜养殖双壳类。可见海域深度越深，双壳类高养殖潜力区比例及面积均变小，而鱼类高养殖潜力区逐渐变大。

4 讨论

4.1 鱼类和双壳类的养殖潜力对比

研究结果表明，在 BYS、ECS 和 SCS 研究区域内，适宜进行鱼类养殖的区域面积为 177.96 万 km²，而适宜进行双壳类养殖的面积为 9.22 万 km²。双壳类适宜养殖区覆盖面积相较鱼类要少很多，且适宜养殖区域呈零散分布。其一方面可能是对叶绿素的要求相对保守导致的；另一方面原因可能是双壳

2020年7月

类本身不适合进行深远海养殖,有待之后继续作探讨^[33]。实际上,如果环境条件相对适宜,也可以在评估结果以外的区域选择半精养或者人工提供营养,创造一种利润相对较低的养殖模式。在优化生产方式的同时,提高资源利用率,促进深远海养殖的发展^[40]。

4.2 不同海区的养殖潜力分析

海表温度是影响海洋物种繁殖、生长、发育的重要因子,本文将海表温度与养殖物种耐受温度进行匹配与定量分析。图6所示的BYS海区鱼类 \overline{GPI} 变化最大,而ECS和SCS海区 \overline{GPI} 分布较集中,这与中国海域海表温度分布状况有关。渤、黄海北部易受陆地气候影响,秋冬季温度明显低于南部,而秋季南北温度呈均匀分布,进而导致渤海温度变化范围最大;东海由于受黑潮季节变化和沿岸流的影响,其温度梯度较大;南海面积大、半封闭、受到洋流、陆架流影响小且处于低纬,其海温分布均匀^[35]。因此,对于鱼类来说,在物种与地理位置匹配过程中,BYS海区因年温差较大以致某些位置无法匹配到合适的鱼类,即出现 \overline{GPI} 值为0的格网,导致该格网10年平均 \overline{GPI} 值偏小,从而使渤海海区 \overline{GPI} 值变化幅度变大;而在ECS和SCS海区温度变化范围相对较小,则对应匹配到耐受温度相近的鱼种较多,其评估结果 \overline{GPI} 值分布较集中,可优先考虑布局ECS和SCS海区。此外,从中国海域化学条件看,BYS海区未达到深远海养殖水质标准^[1],这也可能是导致低潜力区存在的原因,该海区后期鱼类养殖需要更细致地规划选址,以尽可能选择潜力值较大的区域。同理,在SCS海区双壳类养殖高潜力区最多,可优先选择SCS进行双壳类养殖。

4.3 不同深度等级的养殖潜力分析

由于中国海域受到外海海流和季风影响下的沿岸海流的作用,表现为越靠近陆地,SST水平梯度越大;且东海近岸温度梯度较大,向东逐渐减弱;南海SST分布较一致;在海陆温差、海流和沿岸流的共同影响下,SST梯度在海峡、近岸海域比远海大^[1,35]。从深度角度来看,深度越浅,其对应的温度变化范围相对越大,这可能是导致20~40 m深度海域鱼类 \overline{GPI} 变化最大的原因,即同时存在潜力较低

和较高的区域,需要进一步精准规划,以尽可能选择高潜力区。深度大于80 m的海域,鱼类 \overline{GPI} 值都大于3.1,为中、高潜力区,鱼类可优先考虑深度较深的海域进行远海养殖,但同时考虑到设备的固定和经济效益,养殖选址应尽可能选择 \overline{GPI} 值较大且深度较浅的海域。而双壳类因其自身的生物学特性更适宜离岸较近、深度较浅的海域。

4.4 物种和约束因子的选择

本文选择180种海水养殖物种进行养殖潜力的空间分析。一方面是考虑到水产养殖新物种的快速发展以及目标养殖物种的转变,选用多物种比单一(或者几个)物种作为评估指标更具可靠性^[41,42];另一方面,本文对中国深远海养殖潜力的空间分布进行初步量化分析,主要考虑平均潜力而非最大潜力,因而以多物种 GPI 平均值提供相对保守的评估。此外,无论近岸还是远海海水养殖,均会从经济出发选择经济物种,本文关于养殖潜力在空间上的分布,更注重物种对环境的适应以及该环境的平均生产潜力,因而选用多种主要海水养殖物种。该结果可为后期养殖选址提供初步参考,而当针对具体地理位置养殖活动时需进一步作物种筛选并考虑最大潜力及最大效益。

深远海养殖需同时考虑物种生物学特性及经济现实性。本文主要结合海表温度、叶绿素、深度展开分析。温度是影响物种摄食、生长发育的主要因素,且环境水温的变化范围与养殖品种最佳生长温度的对应程度越高,生长周期越短,则养殖系统的产能就越高^[7]。双壳类需要足够的天然食物来促进生长,研究发现叶绿素a浓度是食物可用性的良好代表,并且是最稳健的可用指标^[33],因此将双壳类养殖限制在叶绿素浓度较高的区域。大多数水产养殖设施需要锚定在海底,且随深度的增加、离岸距离的加大,费用也增多,因而本文将最大深度限制在2000 m以提供一些经济现实性。此外,根据符合国情的深远海定义,对离岸3 km海域进行排除^[37]。海洋保护区主要侧重于保护,是限制养殖活动开展的区域,因此在分析中也进行了排除。上述因子中,海表温度的选择是为匹配某海域位置所有的潜在养殖物种,以得出该位置的养殖潜力,这是

潜力分析的第一步,也是最为关键的一步;而其他因子的选择主要是在空间上进一步对不适宜养殖区域进行排除,如从叶绿素角度排除不理想的双壳类养殖区域,从深度角度排除相对不经济的养殖区域。离岸距离、深度、叶绿素等限制条件过泛或者过保守都会影响深远海养殖潜力空间分布结果,目前暂时没有具体、客观、统一的约束值限定,因而本文基于经验及已有研究选定了参数。

5 结论与展望

5.1 结论

本文通过物种生物学特性和深远海海洋环境的耦合,对中国深远海域鱼类和双壳类养殖潜力的空间分布进行量化分析,结果显示:

(1)对于鱼类,渤海(BYS)、东海(ECS)和南海(SCS)海区适宜面积分别约为19.98、76.29、81.69万 km^2 ;对于双壳类,渤海、东海和南海海区适宜面积分别约为3.02、4.17、2.03万 km^2 。

(2)从海区角度看,在进行鱼类养殖布局时,应优先考虑东海和南海;渤海由于鱼类养殖潜力值变化最大,需要更细致地规划选址,尽可能选择潜力值较大的区域;双壳类养殖可优先选择南海。

(3)从海域深度角度看,鱼类可优先考虑深度较深的海域进行远海养殖,而双壳类适宜离岸较近、深度较浅的海域。本文分析结果可为深远海养殖空间布局提供参考,对深远海养殖的具体实践具有指向性意义。

5.2 展望

在中国已有的深远海养殖试验研究中,韩立民^[43]等提出要以黄海冷水团为切入点开展国家离岸养殖试验区;2017年中国首艘养殖工船“鲁岚渔养61699”在日照下水启用养殖鲑鱼,全潜式智能装备“深蓝1号”在山东日照以东130海里的黄海启用,进行三文鱼养殖等^[44];陈文河^[29]等认为北部湾海水养殖潜力较大,目前已启动多项转产转业项目。这些实际试验均位于本评估鱼类养殖中、高潜力区域,一定程度上证明了分析结果的可靠性。

深远海水域是复杂的海洋环境。除了文中所选用的环境参数外,养殖活动还受到垂向多层海水温度、溶解氧、海水盐度密度、海水化学条件、海流

和海洋锋面等^[2,5,45]等环境条件的影响。养殖技术经验、人类活动、需求压力以及海陆接力物流等也是深远海养殖的重要限制条件。今后的研究工作将进一步综合考虑多方面因素完善目前的潜力评估。对于具体海域和具体养殖物种,环境参数的选取需要进一步大量细致的研究,以便为养殖空间布局提供更加详细和精准的参考。

参考文献(References):

- [1] 马云瑞,郭佩芳.我国深远水养殖环境适宜条件研究[J].海洋环境科学,2017,36(2):249-254.[Ma Y R, Guo P F. The research of suitable conditions for Chinese mariculture environment in deep-water area far from coast[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(2): 249-254.]
- [2] 安皓,王天虹,王刚.我国深远海养殖浅析[J].海洋开发与管理,2017,34(S2):138-141.[An H, Wang T H, Wang G. The first large-scale ship of China for high sea farming: About Lulan Yuyang 61699[J]. Ocean Development and Management, 2017, 34 (S2): 138-141.]
- [3] 董双林.多维视角下的新时代水产养殖业发展[J].水产学报,2019,43(1):105-115.[Dong S L. The development of aquaculture in the new era from a multi-dimensional perspective[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(1): 105-115.]
- [4] 董双林.高效低碳:中国水产养殖业发展的必由之路[J].水产学报,2011,35(10):1595-1600.[Dong S L. High efficiency with low carbon: The only way for China aquaculture to develop[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(10): 1595-1600.]
- [5] 麦康森,徐皓,薛长湖,等.开拓我国深远海养殖新空间的战略研究[J].中国工程科学,2016,18(3):90-95.[Mai K S, Xu H, Xue C H, et al. Study on strategies for developing offshore as the new spaces for mariculture in China[J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(3): 90-95.]
- [6] 闫国琦,倪小辉,莫嘉嗣.深远海养殖装备技术研究现状与发展趋势[J].大连海洋大学学报,2018,33(1):123-129.[Yan G Q, Ni X H, Mo J S. Research status and development tendency of deep sea aquaculture equipments: A review[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2018, 33(1): 123-129.]
- [7] 黄温赞,鲍旭腾,蔡计强,等.深远海养殖装备系统方案研究[J].渔业现代化,2018,45(1):33-39.[Huang W Y, Bao X T, Cai J Q, et al. Study on solution of deep-sea aquaculture equipment system [J]. Fishery Modernization, 2018, 45(1): 33-39.]
- [8] 徐皓.水产养殖设施与深水养殖平台工程发展战略[J].中国工程科学,2016,18(3):37-42.[Xu H. Development strategy for

2020年7月

- aquaculture facility and deepwater aquaculture platform[J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(3): 37-42.]
- [9] 徐皓, 湛志新, 蔡计强, 等. 我国深远海养殖工程装备发展研究[J]. 渔业现代化, 2016, 43(3): 1-6. [Xu H, Chen Z X, Cai J Q, et al. Research on the development of deep sea aquaculture engineering equipment in China[J]. Fishery Modernization, 2016, 43(3): 1-6.]
- [10] 我国首个深远海大型养殖平台启动构建[J]. 中国渔业经济, 2014, 32(6): 3. [China's first deep-sea large-scale breeding platform started construction[J]. Chinese Fisheries Economics, 2014, 32(6): 3.]
- [11] 黄一心, 徐皓, 丁建乐. 我国离岸水产养殖设施装备发展研究[J]. 渔业现代化, 2016, 43(2): 76-81. [Huang Y X, Xu H, Ding J L. Research on the development of offshore aquaculture facilities and equipment in China[J]. Fishery Modernization, 2016, 43(2): 76-81.]
- [12] 董双林, 黄六一, 高勤峰, 等. 一种深远海网箱养殖综合平台: 中国, CN106417128B[P]. 2019-03-12. [Dong S L, Huang L Y, Gao Q F, et al. Comprehensive Platform for Deep-Sea Ocean Cage Culture: China, CN106417128B[P]. 2019-03-12.]
- [13] 吕华庆. 欧洲深水网箱养殖对我们的启示[J]. 渔业信息与战略, 2003, 18(10): 6-8. [Lv H Q. Inspiration from European deep sea cage aquaculture[J]. Fishery Information & Strategy, 2003, 18(10): 6-8.]
- [14] 徐君卓. 挪威网箱养鱼持续高速发展的经验与启迪[J]. 海洋渔业, 2000, 22(4): 180-184. [Xu J Z. Experience and inspiration of sustained and rapid development of Norwegian cage fish farming[J]. Marine Fisheries, 2000, 22(4): 180-184.]
- [15] 张金泉, 胡庆松, 申屠基康, 等. 海上网箱网衣检测用框架式 AUV 设计与试验[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(4): 607-612. [Zhang J Q, Hu Q S, Shentu J K, et al. Frame-type AUV design and experiment for sea cage net damage detection[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2016, 25(4): 607-612.]
- [16] 姚腾. 全球最大深海养殖工船上鞍钢钢板[J]. 中国设备工程, 2019, (5): 6. [Yao T. The world's largest deep-sea aquaculture industrial ship with upper Angang steel plate[J]. China Plant Engineering, 2019, (5): 6.]
- [17] 崔铭超, 金娇辉, 黄温赟. 养殖工船系统构建与总体技术探讨[J]. 渔业现代化, 2019, 46(2): 61-66. [Cui M C, Jin J H, Huang W Y. Discussion about system construction and general technology of aquaculture platform[J]. Fishery Modernization, 2019, 46(2): 61-66.]
- [18] 中国船舶在线. 我国第一艘养殖工船“鲁岚渔 61699”启航[EB/OL]. (2017-07-13) [2019-11-29]. https://www.sohu.com/a/156765955_313834. [China Ship Online. China's First Aquaculture Vessel "Lulanyu 61699" Set Sail [EB/OL]. (2017-07-13) [2019-11-29]. https://www.sohu.com/a/156765955_313834.]
- [19] 胡昱, 黄小华, 陶启友, 等. 基于 CFD-EDM 的自动投饵饲料颗粒气力输送数值模拟[J]. 南方水产科学, 2019, 15(3): 113-119. [Hu Y, Huang X H, Tao Q Y, et al. Simulation of automatic pneumatic conveying process of automatic feeding system based on computational fluid dynamics-discrete element method[J]. South China Fisheries Science, 2019, 15(3): 113-119.]
- [20] 刘吉伟, 王宏策, 魏鸿磊. 深水网箱养殖自动投饵机控制系统设计[J]. 机电工程技术, 2018, 47(9): 145-148. [Liu J W, Wang H C, Wei H L. Design of automatic feeding machine control system for deep water cage culture[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 47(9): 145-148.]
- [21] Aas T S, Oehme M, Sørensen M, et al. Analysis of pellet degradation of extruded high energy fish feeds with different physical qualities in a pneumatic feeding system[J]. Aquacultural Engineering, 2011, 44(1): 25-34.
- [22] Oehme M, Aas T S V, Sørensen M, et al. Feed pellet distribution in a sea cage using pneumatic feeding system with rotor spreader[J]. Aquacultural Engineering, 2012, 51: 44-52.
- [23] 彭安华, 刘成文, 陆波. 一种带有清洗装置和数据采集系统的深水网箱[J]. 南方农业, 2016, 10(3): 169-171. [Peng A H, Liu C W, Lu B. Deep water cage with cleaning device and data acquisition system[J]. South China Agriculture, 2016, 10(3): 169-171.]
- [24] 庄集超, 庞洪臣, 刘子浪, 等. 一种新型深海网箱网衣清洗机器人设计[J]. 机械, 2018, 45(1): 72-75. [Zhuang J C, Pang H C, Liu Z L, et al. Design of a new deep-sea net cage cleaning robot[J]. Machinery, 2018, 45(1): 72-75.]
- [25] 鲁伟. 网箱养殖鱼类分级与起捕技术的试验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004. [Lu W. Experimental Study on the Technology of Fish Grading and Harvesting for Cage Mariculture[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.]
- [26] 关长涛, 黄滨, 林德芳, 等. 深水网箱养殖鱼类的分级与起捕技术[J]. 渔业信息与战略, 2005, (7): 3-6. [Guan C T, Huang B, Lin D F, et al. Technology of size grading and harvesting of farmed fish in deep sea net cages[J]. Fishery Information & Strategy, 2005, (7): 3-6.]
- [27] Long X P, Xu M S, Lyu Q, et al. Impact of the internal flow in a jet fish pump on the fish[J]. Ocean Engineering, 2016, 126: 313-320.
- [28] 于千钧, 慕永通. 海湾扇贝离岸养殖的经济潜力分析[J]. 中国渔业经济, 2015, 33(1): 65-70. [Yu Q J, Mu Y T. An analysis on economic potential for the bay scallop offshore aquaculture[J]. Chinese Fisheries Economics, 2015, 33(1): 65-70.]
- [29] 陈文河, 秦明双, 卢伙胜, 等. 北部湾渔民转产转业养殖潜力分析[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(34): 15250-15253. [Chen W

- H, Qin M S, Lu H S, et al. Aquaculture potential analysis of fisherman's job transfer in Beibu Gulf[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(34): 15250-15253.]
- [30] Alvarez-Lajonchère L, Ibarra-Castro L. Relationships of maximum length, length at first sexual maturity, and growth performance index in nature with absolute growth rates of intensive cultivation of some tropical marine fish[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2012, 43(5): 607-620.
- [31] Mathews C P, Samuel M. Using the growth performance index Phi to choose species aquaculture: An example from Kuwait[J]. Aquabyte, 1990, 3(2): 2-4.
- [32] Pauly D, Munro J L. Once more on the comparison of growth in fish and invertebrates[J]. Fishbyte, 1984, 2(1): 21-22.
- [33] Gentry R R, Froehlich H E, Grimm D, et al. Mapping the global potential for marine aquaculture[J]. Nature Ecology & Evolution, 2017, 1: 1317-1324.
- [34] Froehlich H E, Gentry R R, Halpern B S. Synthesis and comparative analysis of physiological tolerance and life-history growth traits of marine aquaculture species[J]. Aquaculture, 2016, 460: 75-82.
- [35] 宝乐尔其木格. 中国近海海温长期变化特征及其对沿岸气候的影响[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014. [Baoleerqimuge. The Long Term Change Characteristics of China Offshore Sea Surface Temperature and Its Effect on Coastal Climate[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2014.]
- [36] 田志福. 元江水系越鳢的年龄, 生长与种群保护研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010. [Tian Z F. Studies on Age, Growth and Population Protection of *Mystus Pluriradiatus* in Yuanjiang River[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.]
- [37] 王鲁民. 深远海养殖将会是水产养殖主要空间拓展方向[EB/OL]. (2018-05-31) [2019-11-29]. <http://www.fishfirst.cn/article-101514-1.html>. [Wang L M. Far-Reaching Aquaculture Will Be the Main Spatial Development Direction of Aquaculture[EB/OL]. (2018-05-31) [2019-11-29]. <http://www.fishfirst.cn/article-101514-1.html>.]
- [38] 王维礼, 张琳. 基于步行指数与网络分析的轨道交通站点影响区划定及分类方法: 以天津为例[J]. 城市, 2019, (4): 63-74. [Wang W L, Zhang L. Influencing zone delimitation and classification method of rail transit station based on walking index and network analysis: Taking Tianjin as an example[J]. City, 2019, (4): 63-74.]
- [39] 杨发鹏, 张雪唱, 李宗阳. 城市旅游“三生”竞争力空间分异: 以西北五省为例[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 664-672. [Yang F P, Zhang X C, Li Z Y. Spatial differentiation of the “production-life-ecology” competitiveness in urban tourism: A case study of five provinces in northwest China[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 664-672.]
- [40] 邵桂兰, 孔海崢, 李晨. 中国海水养殖的净碳汇及其与经济耦合关系[J]. 资源科学, 2019, 41(2): 277-288. [Shao G L, Kong H Z, Li C. Net amount of mariculture carbon sink and its coupling relationship with economics growth of China[J]. Resources Science, 2019, 41(2): 277-288.]
- [41] Duarte C M, Marba N, Holmer M. Ecology: Rapid domestication of marine species[J]. Science, 2007, 316(5823): 382-383.
- [42] Froehlich H E, Gentry R R, Rust M B, et al. Public perceptions of aquaculture: Evaluating spatiotemporal patterns of sentiment around the world[J]. Plos One, 2017, 12(1): e0169281.
- [43] 韩立民, 郭永超, 董双林. 开发黄海冷水团建立国家离岸养殖试验区的研究[J]. 太平洋学报, 2016, 24(5): 79-85. [Han L M, Guo Y C, Dong S L. Research on establishing a national offshore aquaculture experimental zone based on the development of the Yellow Sea cold water mass[J]. Pacific Journal, 2016, 24(5): 79-85.]
- [44] 董双林. 黄海冷水团大型鲑科鱼类养殖研究进展与展望[J]. 中国海洋大学学报, 2019, 49(3): 1-6. [Dong S L. Researching progresses and prospects in large *Salmonidae* farming in cold water mass of Yellow Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(3): 1-6.]
- [45] 张耀光. 黄海北部长山群岛海洋农牧化分区探讨[J]. 地理学报, 1991, (1): 47-56. [Zhang Y G. Approach to the regionalization of the agricultural-pastoralization around Changshan Islands in Northern Huanghai Sea[J]. Acta Geographica Sinica, 1991, (1): 47-56.]

Spatial analysis of the potential of deep-sea aquaculture in China

HOU Juan^{1,2}, ZHOU Weifeng¹, WANG Lumin¹, FAN Wei^{1,3}, YUAN Zuohui^{2,3}

(1. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Fisheries Resources Remote Sensing and Information Technology, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

Abstract: Expanding the new space for marine aquaculture and carrying out deep-sea aquaculture is of great significance for the improvement of China's offshore ecological environment, the guarantee of food security, the effective use of marine resources, and marine sovereignty. In this study, 180 mariculture species (120 species of fish and 60 species of bivalves) were analyzed. Through the comparison of the temperature tolerance range of each species and the sea surface temperature range of the study area, the species-to-geographical area matching was achieved. Then the average GPI (growth performance index) values of fish and bivalves at various locations in the sea area were obtained. By further restricting on conditions such as offshore distance and depth based on threshold distance, the potential of deep-sea aquaculture in China was quantitative analyzed. The results are that in the areas where the evaluation conditions are met: (1) For fish, the suitable areas for the Bohai and Yellow Sea (BYS), East China Sea (ECS), and South China Sea (SCS) are 19.98, 76.29, and 81.69 10^4 km²; for bivalves, the suitable areas of the Bohai and Yellow Sea, East China Sea, and South China Sea are 3.02, 4.17, and 2.03 10^4 km² respectively. (2) With regard to different sea areas, fish aquaculture can be given priority in the East China Sea and South China Sea; however, the potential value of fish aquaculture in the Bohai and Yellow Sea is the largest, and fish aquaculture in the later stage needs to be more carefully planned and sited to select areas with large potential values as much as possible; bivalve aquaculture can give priority to the South China Sea. (3) With regard to different depths: fish can be preferentially considered for deeper sea areas; and bivalves are suitable for breeding in offshore areas that are closer to the shore and shallower in depth. According to the evaluation results of breeding potential, sea spatial planning can be carried out to provide some reference for management departments and aquaculture enterprises.

Key words: deep-sea aquaculture; breeding potential; spatial analysis; fish; bivalves; China