

DOI: 10.12264/JFSC2021-0034

基于栖息地指数的渤海湾鱼卵环境适应性

张聿琛^{1,2}, 谷德贤³, 徐海龙^{1,4}, 薛薇¹, 于小涵¹

1. 天津农学院水产学院, 天津 300384;
2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
3. 天津市水产研究所, 天津 300171;
4. 天津市水产生态与养殖重点实验室, 天津 300384

摘要: 为深入了解渤海湾鱼卵与栖息环境间的关系, 掌握鱼卵分布的区域特征, 本研究基于 2014 年至 2018 年(各年 5—7 月)渤海湾鱼卵和海洋环境调查数据, 根据海水表面温度(sea surface temperature, SST)、海水表面盐度(sea surface salinity, SSS)和海水 pH, 采用几何平均法(geometric mean method, GMM)、最小值法(minimum method, MINM)和连乘法(continued product method, CPM)分别建立渤海湾鱼卵 5—7 月的栖息地适宜性指数模型。结果显示, 渤海湾鱼卵主要分布的 SST、SSS 和 pH 范围分别是 21.6~24.8 °C、30.07~32.60 和 8.03~8.21; 最适 SST、SSS 和 pH 以及适应范围存在月间差异; 5 月, 鱼卵的分布可以较好地被 HSI 模型解释; 6 月和 7 月, SST、SSS 和 pH 不再成为鱼类产卵的最主要限制因子, 而其他未加入模型的因素, 如地理位置、海底底质、海流等可能主导了鱼卵的分布。研究认为, 考虑到鱼卵对环境条件要求的严苛性, CPM 更适于渤海湾鱼卵栖息地适宜性指数模型的构建, 可用于鱼卵分布区域的推测。

关键词: 鱼卵; 海水表面温度; 海水表面盐度; pH; 栖息地适应性指数; 渤海湾

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)12-1568-08

鱼卵是鱼类生命周期中重要的初级阶段, 是鱼类资源可持续利用的基础^[1]。鱼卵的存活状况是影响鱼类资源补充量的关键因素之一^[2], 直接决定着成体的资源量^[3]。同时, 鱼卵作为饵料生物, 是海洋食物链上的一个重要环节, 在能量传递过程中扮演了关键角色^[4], 是构成海洋生态系统的重要组成部分。鱼卵的数量和分布是评价产卵场、估算亲体资源量和渔业补充量最直接有效的信息, 也是鱼类资源养护管理和渔业生态环境保护的重要参考依据^[5]。

鱼卵不具备游泳能力, 基本上营随水漂流的生活^[6]。鱼卵的生命力脆弱, 因此, 其数量和分布对环境条件的依赖程度非常高。谷德贤等^[7]通过建立广义加性模型, 发现温度是影响渤海湾天津

海域鱼卵丰度的主要因素。杨艳艳等^[8]基于 Pearson 相关性分析, 发现鱼卵数量与盐度之间呈显著相关。王爱勇^[9]利用多元分析方法, 发现鱼卵丰度分布与温度、盐度、pH 等相关。

渤海湾位于渤海西部, 是黄渤海多种经济鱼虾类重要的产卵场和幼体的主要育肥场^[7,10], 对我国北方海域渔业资源群体的繁育和延续起了重要的作用。但近些年, 随着环渤海地区经济的快速发展, 大量生活污水和有机污染物直接或间接地排放入海, 导致渤海湾生态环境恶化^[11]。本研究基于 2014—2018 年间(各年 5—7 月)在渤海湾开展的鱼卵丰度和海水表面温度(sea surface temperature, SST)、海水表面盐度(sea surface salinity, SSS)和海水表面 pH 的调查数据, 应用栖息地适

收稿日期: 2021-01-22; 修订日期: 2021-04-04.

基金项目: 农业农村部物种资源保护费(渔业)项目(171821301354051015).

作者简介: 张聿琛(1998-), 男, 硕士研究生, 从事渔业海洋学方向的研究. E-mail: yczhang.shou@gmail.com

通信作者: 徐海龙, 男, 博士, 副教授, 从事渔业资源评估方向的研究. E-mail: beiji80@163.com

宜性指数(habitat suitability index, HSI)模型对渤海湾鱼卵的环境适应性进行评价,旨在丰富渤海湾鱼卵资源状况与环境条件因子关系的研究的内容,为渤海湾鱼卵资源保护、生态环境修复和渔业可持续发展提供更多的科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究所用数据来源于 2014 年至 2018 年(各年 5—7 月)在渤海湾(117°45′~118°25′E, 38°15′~39°08′N)进行的季节性科学调查,共计 15 个航次 177 个站位次(图 1, 表 1),调查数据包括鱼卵丰度、海水表面温度(SST)、海水表面盐度(SSS)和海水表面 pH。调查依据《海洋调查规范》(GB/T 12763-2007)^[12]开展,其中鱼卵采集使用大型浮游生物网(网长 280 cm,网口内径 80 cm,筛绢孔径约为 0.505 mm)在每个站位进行表层(3 m 以浅)水平拖网采样,每站位拖曳时长 10 min,拖速 1~2 kn。加入样本体积量 5%的中性甲醛溶液对样品进行固定,带回实验室进行分拣、种类鉴定及计数等。

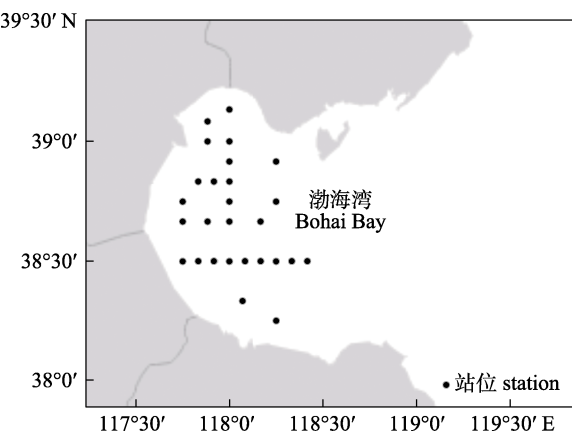


图 1 2014—2018 年渤海湾鱼卵资源调查站位示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the scientific investigation site from 2014 to 2018 in Bohai Bay

表 1 2014—2018 年在渤海湾的科学调查站位统计
Tab. 1 The number of scientific investigation sites of each month from 2014 to 2018 in Bohai Bay

月份 month	2014	2015	2016	2017	2018
5 月 May	9	17	—	13	13
6 月 Jun.	9	9	10	26	26
7 月 Jul.	9	9	10	13	13

注: “—”表示未开展调查。
Note: “—” denotes that the scientific investigation was not carried out in this month.

1.2 栖息地适宜性指数模型的建立

相对资源密度指数(relative abundance index, RAI)是衡量资源相对密度的值^[13],由某一站次的鱼卵丰度除以所有站次的鱼卵丰度的最大值得到。本研究中,将其作为适宜性指数(suitability index, SI)的观测值,用于描述鱼卵对于单个环境因子的适宜性,SI 数值介于 0~1, 0 表示不适宜生境,1 表示最适宜生境。

$$SI_{m,i} = RAI_{m,i} = \frac{D_{m,i}}{D_{\max m,i}}$$

式中, m 为月份, $D_{m,i}$ 为 m 月第 i 个站位单位体积海水中鱼卵的个数(ind/m³), $D_{\max m,i}$ 为 m 月所有站位单位体积海水中鱼卵数量的最大值(ind/m³), $RAI_{m,i}$ 为 m 月第 i 站位的相对资源密度指数, $SI_{m,i}$ 为 m 月第 i 站位的单因子适宜性指数值。

将各环境因子按一定区间间隔(其中, SST 以 0.5 °C 为区间间隔, SSS 以 0.2 为区间间隔, pH 以 0.05 为区间间隔)划分为若干分段,以各段内 SI 的最大值为因变量,各段内 SI 的中值对应的环境因子水平为自变量,基于一元非线性回归模型^[14]分别对 3 种环境进行适宜性指数建模。

$$SI_k = e^{-a(x_k - b)^2}$$

式中, a 和 b 为待估算的参数, k 为环境因素。

栖息地适宜性指数(HSI)在 20 世纪 80 年代被提出^[15],作为一种衡量栖息地优劣程度的指数,目前已在栖息地评价、渔情预报等方面得到了广泛应用^[16-18]。本研究分别采用几何平均法(geometric mean method, GMM)、最小值法(minimum method, MINM)和连乘法(continued product method, CPM)构建栖息地适宜性指数模型。HSI 值介于 0~1, 0 表示不适宜, 1 表示最适宜。

$$HSI_{GMM} = \sqrt[3]{SI_{SST} + SI_{SSS} + SI_{pH}}$$

$$HSI_{MINM} = \min(SI_{SST}, SI_{SSS}, SI_{pH})$$

$$HSI_{CPM} = SI_{SST} \times SI_{SSS} \times SI_{pH}$$

式中, SI_{SST} 、 SI_{SSS} 和 SI_{pH} 分别为 SI 与 SST、SI 与 SSS、SI 与 pH 的适宜性指数。

1.3 栖息地适宜性指数模型评价与验证

将观察值 RAI 和预测值 HSI 进行线性回归,

通过分析线性回归模型的参数、决定系数(r^2)和赤池信息准则(Akaike's information criterion, AIC)评价模型的预测性能^[19-20]。

线性回归方程如下:

$$O_i = \alpha + \beta \times P_i$$

式中, O_i 为观察值 RAI, P_i 为预测值 HSI; α 为回归系数截距, β 为斜率。

AIC 计算公式为^[21]:

$$AIC=2k+n \times \ln \frac{RSS}{n}$$

式中, n 为观察数, RSS 为残差平方和。AIC 值越小, 模型越好。

数据处理及图形绘制使用 R×64 4.0.3 软件完成。

2 结果与分析

2.1 鱼卵的分布特征

在时间上, 鱼卵主要出现在 5 月和 6 月, 其中 5 月采集到的鱼卵占总航次的 33.94%, 6 月占 60.57%(表 2)。在空间上, 西部(近岸海域)略多于

东部, 各纬度范围内均有鱼卵分布, 其中 38.50°~38.75°N 范围的海域, 鱼卵的分布约占 90.42%。鱼卵主要分布的 SST、SSS 和 pH 范围分别是 21.6~24.8 ℃、30.07~32.60 和 8.03~8.21, 出现鱼卵的频次分别占总调查航次的 77.33%、86.48%和 86.33%。

2.2 适宜性指数模型建立

对 SST、SSS 和 pH 进行适宜性指数建模, 模型均具有显著的统计学意义($P<0.01$)(表 3)和较好的拟合(图 2)。5 月的 SI 曲线拟合度最好, r^2 均大于 0.907, 6 月的拟合度最差, r^2 最小值仅为 0.534。在 5—7 月, 鱼卵的最适宜 SSS、pH 波动不大, 7 月最适宜 SST 约为 27 ℃, 较 5 月和 6 月的适宜 SST 有明显增加。基于模型参数 a 以及 SI 曲线结果, 认为 5 月鱼卵对于 SST、SSS 以及 pH 有较窄的适宜区间, 而 6 月和 7 月, 对 SST、SSS 和 pH 均有较宽的适宜范围。

2.3 HSI 模型比较

根据 GMM、MINM 和 CPM 计算得到的 HSI 与 RAI 的拟合度进行比较发现(表 4), 在 5 月和 7

表 2 2014—2018 年渤海湾鱼卵丰度的时间统计
Tab. 2 Abundance of fish eggs from 2014 to 2018 in Bohai Bay

月份 month	2014	2015	2016	2017	2018
5 月 May	0.232	0.243	—	2.889	0.019
6 月 Jun.	0.068	0.076	1.186	1.380	0.993
7 月 Jul.	0.125	0.147	0.059	0.091	0.018

注: “—”表示未开展调查。
Note: “—” denotes that the scientific investigation was not carried out in this month.

表 3 5—7 月渤海湾鱼卵适宜性指数模型
Tab. 3 Statistics and parameters of the fitted suitability index (SI) model for fish eggs in Bohai Bay from May to July

月份 month	模型 model	参数 a parameter a	参数 b parameter b	r^2	P
5 月 May	SI _{SST}	3.193	22.008	0.945	<0.001**
	SI _{SSS}	6.253	30.459	0.907	<0.001**
	SI _{pH}	338.084	8.104	0.956	<0.001**
6 月 Jun.	SI _{SST}	0.438	23.775	0.697	0.004**
	SI _{SSS}	0.623	31.682	0.534	<0.001**
	SI _{pH}	62.309	8.129	0.851	<0.001**
7 月 Jul.	SI _{SST}	0.842	26.986	0.876	<0.001**
	SI _{SSS}	1.517	30.528	0.919	<0.001**
	SI _{pH}	55.636	8.133	0.686	0.005**

注: “**”表示相关性极显著($P<0.01$)。
Note: “**” indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

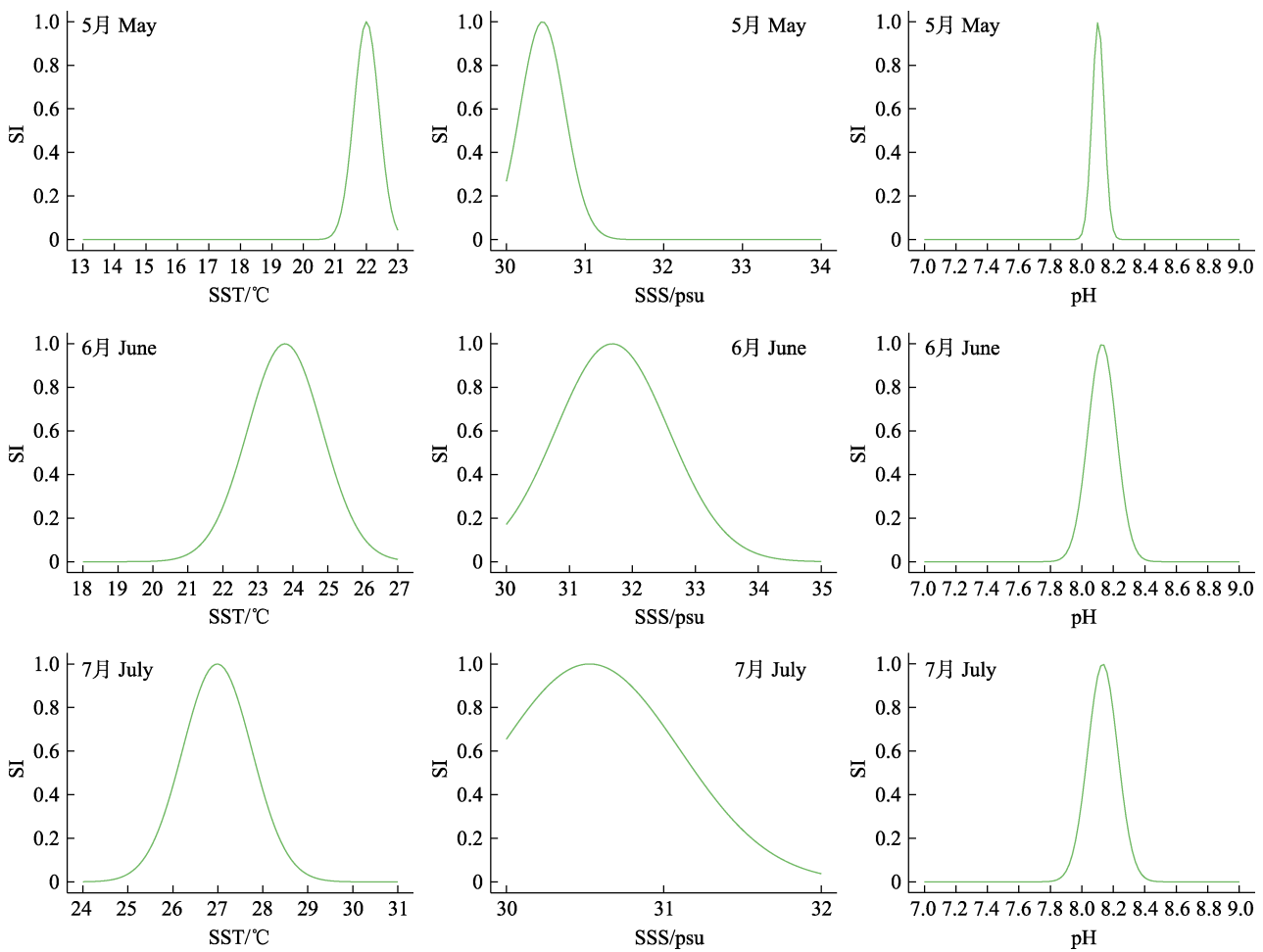


图 2 5—7 月渤海湾鱼卵适宜性指数曲线

Fig. 2 Monthly fitted suitability index (SI) curves inferred from the relationship between fish eggs abundance and sea surface temperature (SST), sea surface salinity (SSS), and pH from May to July in Bohai Bay

表 4 HSI 模型预测性能比较

Tab. 4 Predictive performance of habitat suitability index (HSI) model from May to July					
月份 month	模型 model	截距 α intercept α	斜率 β slope β	r^2	AIC
5 月 May	GMM	0.008	0.644	0.550	-44.996
	MINM	-0.004	0.865	0.550	-44.971
	CPM	0.012	1.350	0.654	-58.335
6 月 Jun.	GMM	-0.025	0.370	0.154	1.533
	MINM	0.039	0.334	0.152	2.000
	CPM	0.076	0.363	0.152	1.675
7 月 Jul.	GMM	-0.041	0.445	0.190	-6.4933
	MINM	0.019	0.417	0.149	-3.863
	CPM	0.047	0.654	0.316	-15.649

月, CPM 具有最好的拟合度(5 月: $r^2=0.654$, AIC=-58.335; 7 月: $r^2=0.316$, AIC=-15.649), 在 6 月, GMM 的拟合度稍好于 MINM 和 CPM。总体而言, 3 种方法计算得到的 HSI 模型在 5 月预测性能最

佳, 在 6 月预测性能最差。

3 讨论

渤海湾是多种经济鱼类的产卵场^[22-23], 有报

道指出,渤海湾的鱼卵主要出现在 5 月和 6 月^[7,22],本研究的结果与此一致,但历史资料显示,1983 年 5 月渤海湾鱼卵、仔稚鱼的数量占全年的 86.5%^[24],而本研究中,6 月鱼卵的占比更大一些(60.57%),这可能与开展调查的日期所处月份中的位置有关^[7]。鱼卵不具备主动游泳的能力^[6],在不考虑海流以及敌害生物摄食等因素的影响时,鱼卵的数量分布主要由生殖群体的产卵活动所决定,生殖群体具有在适宜后代生存和生长的海域进行产卵活动的本能,产卵偏好与环境因子存在明显的相关性^[25-26],故而鱼卵的数量分布与环境因子也具有相关性^[27]。

分析发现,在不同的月份,渤海湾鱼卵具有不同的最适 SST、SSS 和 pH 水平以及适宜范围。研究指出,鱼类对于低温的耐受性弱于高温^[28]。在鱼卵主要出现的 5-7 月,5 月是 SST 最低的月份。本研究结果显示,鱼卵在 5 月的 SST 有最广的分布范围,为 13.2~23.0 °C,要广于 6 月的 18.0~26.2 °C 以及 7 月的 24.0~30.6 °C。根据 SST 对应的 SI 曲线发现,相较于 6 月和 7 月,5 月 SST 对于鱼卵丰度有最高的解释能力($r^2=0.945$),故推测认为,5 月 SST 是鱼卵分布的重要限制因子,而进入到 6 月和 7 月,SST、SSS 以及 pH 基本在鱼卵生存的适宜范围,不再成为鱼类产卵的最主要限制因子,而一些未被模型考虑的因素如地理位置、海底底质、海流等因素的影响比重可能增加,成为限制鱼卵分布的主要条件因子^[2,29]。这从一定程度上解释了模型在 6 月和 7 月的拟合度较差的现象。本研究中,各 SI 以及 HSI 模型都具有统计学上的意义,SST、SSS 和 pH 这 3 个理化因子在不同的月份对于鱼卵分布的影响程度不同,反映为模型的解释能力存在差异,在 6 月出现 r^2 较低的情况,分析认为这是具有一定合理性的。

鱼卵的数量分布是多种条件共同作用的结果^[30-31],在建立 SI 指数模型时,使用单一环境因子作为解释变量时,影响鱼卵相对密度的其他因子,尤其可能起限制性作用的因子,未被完全考虑,势必会减弱模型的可靠度。本研究基于鱼类在生命阶段初期及产卵期对环境的变化最敏感^[30]的前提,在建立各单因子 SI 模型时,通过采用了

取区间内 SI 最大值(即环境因子在该水平对鱼卵最大的支持)进行非线性回归的方法,以减小单变量的解释能力不充分的不足。另外,栖息地适宜性指数方法一般假设栖息地适宜性指数值和栖息地的承载能力是直接线性的关系^[15],对输入数据的全面性和代表性有很强的依赖性,本研究中鱼卵相对资源密度值绝大多数集中在 0.0~0.2,数据分布不均匀,这可能是影响模型拟合效果的因素之一,需要通过增加调查频次和站位,及更科学的站位布设^[32]来改善。

栖息地适宜性指数建模方法不同,估算的结果也会存在很大差异^[13]。栖息地是渔业动物资源繁衍生息、种群规模维持、甚至种群延续的基础条件,正确衡量和评价栖息地的质量是科学管理和保护栖息地的重要前提^[33-34]。本研究分别采用 GMM、MINM 和 CPM 建立 HSI 模型,以决定系数和赤池信息准则(AIC)为标准,认为 CPM 的预测性能最好。

参考文献:

- [1] Zhao J, Zhang S Y, Wang Z H, et al. Analysis on community structure and diversity of fish and macroinvertebrate in Shengsi artificial reef area[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(5): 1045-1056. [赵静, 章守宇, 汪振华, 等. 嵊泗人工鱼礁海域鱼类和大型无脊椎动物群落结构特征[J]. 中国水产科学, 2010, 17(5): 1045-1056.]
- [2] Gao D K, Zhao J, Zhang X M. Species composition and distribution patterns of ichthyoplankton within and outside artificial reefs in Laizhou Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(2): 369-381. [高东奎, 赵静, 张秀梅, 等. 莱州湾人工鱼礁区及附近海域鱼卵和仔稚鱼的种类组成与数量分布[J]. 中国水产科学, 2014, 21(2): 369-381.]
- [3] Wan R J, Zeng D Y, Bian X D, et al. Species composition and abundance distribution pattern of ichthyoplankton and their relationship with environmental factors in the East China Sea ecosystem[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(9): 1375-1398. [万瑞景, 曾定勇, 卞晓东, 等. 东海生态系统中鱼卵、仔稚鱼种类组成、数量分布及其与环境因素的关系[J]. 水产学报, 2014, 38(9): 1375-1398.]
- [4] Fan Z W, Jiang R J, Zhang H L, et al. Community structure of ichthyoplankton and its relationship with environmental factors in Daiquyang spawning ground[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(4): 606-620. [樊紫薇, 蒋日进, 张洪亮, 等. 岱衢洋产卵场鱼卵、仔稚鱼群落结构及其与环境

- 因子的关系[J]. 水产学报, 2020, 44(4): 606-620.]
- [5] Zheng H D. Abundance distribution of fish eggs and larvae and its relation with environmental factors in spring and summer in Dongshan Bay, Fujian[J]. Journal of Applied Oceanography, 2016, 35(1): 87-94. [郑惠东. 福建东山湾春、夏季鱼卵和仔稚鱼丰度分布特征及其与环境因子的关系[J]. 应用海洋学学报, 2016, 35(1): 87-94.]
- [6] Yin M C, Blaxter J H S. Crusing speeds during early development and starvation of marine fish larvae[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1989, 20(1): 1-9. [殷名称, Blaxter J H S. 海洋鱼类仔鱼在早期发育和饥饿期的巡游速度[J]. 海洋与湖沼, 1989, 20(1): 1-9.]
- [7] Gu D X, Wang T, Xu H L, et al. Resource dynamics of fish eggs and larvae in Tianjin sea area[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(4): 557-563. [谷德贤, 王婷, 徐海龙, 等. 天津海域鱼卵、仔稚鱼资源动态研究[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(4): 557-563.]
- [8] Yang Y Y, Gao Y J, Wang J P, et al. Community structure of ichthyoplankton and its relationship with environmental factors in Laizhou Bay[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(10): 2976-2984. [杨艳艳, 高彦洁, 汪健平, 等. 莱州湾春、夏季鱼卵、仔稚鱼群落结构及环境因子相关性[J]. 生态学杂志, 2018, 37(10): 2976-2984.]
- [9] Wang A Y. Preliminary Study of the Ichthyoplankton Assemblage Structure in Laizhou Bay in Spring and it's Correlation with Environmental Factors[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. [王爱勇. 渤海莱州湾春季鱼卵、仔稚鱼群落结构及环境因子相关性的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.]
- [10] Kang Y D. Ecological characteristics of phytoplankton in Bohai Bay in spring and its relationship with fishery resources[J]. Marine Fisheries, 1984, 6(2): 51-53. [康元德. 渤海湾春季浮游植物的生态特点及其与渔业资源的关系[J]. 海洋渔业, 1984, 6(2): 51-53.]
- [11] Yan S Q, Zhu Q L, Yu J, et al. A Quantitative Research on Carrying Capacities of Marine Resources and Environment around Bohai Bay[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018 (6): 46-53. [严淑青, 朱庆林, 余静, 等. 环渤海湾海洋资源环境承载力定量研究[J]. 海洋湖沼通报, 2018(6): 46-53.]
- [12] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. GB/T 12763-2007, Specifications for oceanographic survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763-2007 海洋调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.]
- [13] Chen X J, Feng B, Xu L X. A comparative study on habitat suitability index of bigeye tuna, *Thunnus obesus* in the Indian Ocean[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15(2): 83-92. [陈新军, 冯波, 许柳雄. 印度洋大眼金枪鱼栖息地指数研究及其比较[J]. 中国水产科学, 2008, 15(2): 83-92.]
- [14] Zhang Y N, Guan W J, Li Y D. Construction and verification of a habitat suitability index model for the Indian Ocean *albacore tuna*[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(2): 268-279. [张亚男, 官文江, 李阳东. 印度洋长鳍金枪鱼栖息地指数模型的构建与验证[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(2): 268-279.]
- [15] US Fish and Wildlife Service. Standards for the Development of Habitat Suitability Index Models[M]. Division of Ecological Services, Washington D C 1981.
- [16] Chen X, Li G, Feng B, et al. Habitat suitability index of Chub mackerel (*Scomber japonicus*) from July to September in the East China Sea[J]. Journal of Oceanography, 2009, 65(1): 93-102.
- [17] Tian S, Chen X, Chen Y, et al. Evaluating habitat suitability indices derived from CPUE and fishing effort data for *Ommatrephes bratramii* in the northwestern Pacific Ocean[J]. Fisheries Research, 2009, 95(2-3): 181-188.
- [18] Zeng X, Tanaka K R, Y Chen, et al. Gillnet data enhance performance of rockfishes habitat suitability index model derived from bottom-trawl survey data: A case study with *Sebasticus marmoratus*[J]. Fisheries Research, 2018, 204: 189-196.
- [19] Liu X X, Gao C X, Tian S Q, et al. Distribution of optimal habitats for *Setipinna taty* in the south inshore of Zhejiang province based on habitat suitability index[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(12): 1485-1495. [柳晓雪, 高春霞, 田思泉, 等. 基于栖息地适宜指数的浙江南部近海黄鲫最适栖息地分布[J]. 中国水产科学, 2020, 27(12): 1485-1495.]
- [20] Akaike H. A new look at the statistical model identification [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 716-723.
- [21] Burnhan K, Anderson D. Multimodel Inference: understanding AIC and BIC in Model Selection[J]. Sociological Methods Research, 2004, 33(2): 261-304.
- [22] Xu H L, Gu D X, Qiao X T, et al. Analysis of length-weight relationship for major fishing species from Bohai Bay[J]. South China Fisheries Science, 2014, 10(1): 57-63. [徐海龙, 谷德贤, 乔秀亭, 等. 渤海湾主要渔业资源长度与体质量关系分析[J]. 南方水产科学, 2014, 10(1): 57-63.]
- [23] Xu H L, Zhang G F, Qiao X T, et al. Relationship between Body Length and Body Weight in Mantis Shrimp *Oratos-*

- quilla oratoria* in Northern Yellow Sea[J]. Fisheries Science, 2010, 29(8): 451-454. [徐海龙, 张桂芬, 乔秀亭, 等. 黄海北部口虾蛄体长及体质量关系研究[J]. 水产科学, 2010, 29(8): 451-454.]
- [24] Office of Tianjin Leading Group on Comprehensive Survey of Coastal Zone and Tidal Flat Resources. Report on Comprehensive Survey of Tianjin Coastal Zone and Tidal Flat Resources[M]. Beijing: China Ocean Press, 1987. [天津市海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室. 天津市海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1987.]
- [25] Li J S, Yan L P, Hu F. Analysis of *Scomber japonicus* spawning grounds based on fish eggs and larvae data in the Central and Southern East China Sea[J]. Marine Fisheries, 2020, 42(1): 10-19. [李建生, 严利平, 胡芬. 基于鱼卵仔鱼数据的东海中南部日本鲭产卵场分析[J]. 海洋渔业, 2020, 42(1): 10-19.]
- [26] Lin D M. Spawning strategy of Argentine shortfin squid, *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) in the southwest Atlantic[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015. [林东明. 阿根廷滑柔鱼的产卵策略研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.]
- [27] Grieco A, Koubbi P. A preliminary study of the influence of a coastal frontal structure on ichthyoplankton assemblages in the English Channel[J]. Ices Journal of Marine Science, 1997, 54(1): 93-104.
- [28] Barnes R S K, Hughes R N. An Introduction to Marine Ecology[M]. London: John Wiley & Sons, 1999.
- [29] Yin J, Wang J, Zhang C L, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of *Larimichthys polyactis* eggs in Haizhou Bay and adjacent regions based on two-stage GAM[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(6): 1164-1174. [尹洁, 王晶, 张崇良, 等. 利用 two-stage GAM 研究海州湾及其邻近海域小黄鱼鱼卵的时空分布特征[J]. 中国水产科学, 2019, 26(6): 1164-1174.]
- [30] Sherman K, Lasker R, Richards W, et al. Ichthyoplankton and fish recruitment studies in large marine ecosystems [Includes pollution stress, spawning estimates, Fishery Management Zone, USA][J]. Marine Fisheries Review, 1983, 45(10-12): 1-25.
- [31] Gore J A, Bryant R M. Temporal shifts in physical habitat of the crayfish, *Orconectes neglectus* (Faxon)[J]. Hydrobiologia, 1990, 199(2): 131-142.
- [32] Cao J, Chen Y, Chang J H, et al. An evaluation of an inshore bottom trawl survey design for American lobster (*Homarus americanus*) using computer simulations[J]. Journal of Northwest Atlantic Fishery Science, 2014, 46: 27-39.
- [33] Gong C X, Chen X J, Gao F, et al. Review on habitat suitability index in fishery science[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(2): 260-269. [龚彩霞, 陈新军, 高峰, 等. 栖息地适宜性指数在渔业科学中的应用进展[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(2): 260-269.]
- [34] Yi Y J, Wang Z Y, Yao S M. Habitat suitability model for evaluating Chinese sturgeon spawning sites[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(3): 340-343. [易雨君, 王兆印, 姚仕明. 栖息地适合度模型在中华鲟产卵场适合度中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(3): 340-343.]

Environmental adaptability of fish eggs in Bohai Bay assessed using habitat suitability index method

ZHANG Yuchen^{1,2}, GU Dexian³, XU Hailong^{1,4}, XUE Wei¹, YU Xiaohan¹

1. College of Fishery, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China;

2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Tianjin Fishery Institute, Tianjin 300171, China;

4. Tianjin Key Laboratory of Aqua-ecology and Aquaculture, Tianjin 300384, China

Abstract: As a spawning ground for many fish species, Bohai Bay plays a significant role in maintaining sustainable inshore fish stocks in Bohai and the Yellow Sea. In recent decades, the loss or fragmentation of fish habitats has been taking place in Bohai Bay as a result of exogenous interference factors, such as human activity and climate change. An understanding of the distribution pattern of fish eggs is urgently needed to protect fish recruitment. However, a comprehensive insight into how fish eggs are distributed in Bohai Bay is still lacking. To better understand how environmental conditions affect the distribution of fish eggs in Bohai Bay, an integrated habitat suitability index (HSI) model, including three physical and chemical environmental variables, sea surface temperature (SST), sea surface salinity (SSS), and seawater pH, was developed in this study. Meanwhile, three empirical HSI algorithms (geometric mean method; minimum method; continued product method, CPM) were performed to select the best algorithm. The data used for analysis comes from independent trawl surveys, applying standardized sampling protocols from 2014 to 2018. The results showed that (1) the fish eggs in Bohai Bay were mainly distributed in areas where the ranges of SST, SSS, and pH are 21.6–24.8 °C, 30.07–32.60, and 8.03–8.21, respectively. (2) The SI of each environmental variable varies by month. (3) CPM was the optimal HSI model for fish eggs in Bohai Bay based on the evaluation criteria of Akaike information criterion. (4) In May, the HSI model shows an acceptable performance. In June and July, there may be potential unconsidered factors that dominate the distribution of fish eggs under suitable SST, SSS, and pH conditions. This study enhances our understanding of the relationships between fish eggs and different environmental factors. Moreover, the models built can be used to detect potential spawning grounds for fish in Bohai Bay. These findings may increase awareness among researchers and policymakers. A more comprehensive survey and scientific site layout will be helpful to gain a deeper understanding in the future.

Key words: fish egg; sea surface temperature; sea surface salinity; pH; habitat suitability index; Bohai Bay

Corresponding author: XU Hailong. E-mail: beiji80@163.com