

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.20115

海州湾及邻近海域短吻红舌鲷产卵场的生境适宜性

孙霄¹, 张云雷¹, 徐宾铎^{1,3}, 张崇良^{1,3}, 任一平^{1,2,3}, 薛莹^{1,3}

1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237;

3. 海州湾渔业生态系统教育部野外科学观测研究站, 山东 青岛 266003

摘要: 根据 2014 年和 2016—2018 年 5—8 月在海州湾及邻近海域(33.3°N~35.6°N, 119.0°E~122.0°E)进行的产卵场大面调查数据, 结合海洋表层水温、表层盐度、水深及流速等数据开展了海州湾及其邻近海域短吻红舌鲷(*Cynoglossus joyneri*)产卵场生境适宜性的相关研究。利用提升回归树(boosted regression tree, BRT)模型确定各环境因子的权重, 分别采用算数平均法(AMM)和几何平均法(GMM)建立栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI)模型, 并通过交叉验证检验模型的拟合度。结果表明, 不同月间海州湾及邻近海域短吻红舌鲷产卵场适宜的环境因子范围相似, 但各环境因子所占比重有较大变化。通过交叉验证发现, 5 月、7 月利用几何平均法拟合的栖息地适宜性效果较好, 6 月、8 月算数平均法拟合的效果好。短吻红舌鲷适宜的产卵场分布存在月间变化, 5 月主要集中在研究海域的南部, 6—8 月有逐步北移的趋势, 且随着产卵群体产卵量的增大, 其适宜产卵的生境范围也逐步扩大。本研究表明, 栖息地适宜性指数模型能够较好地反映海州湾及其邻近海域短吻红舌鲷的产卵场生境适宜性及其变化情况。

关键词: 栖息地适宜性指数; 短吻红舌鲷; 鱼卵; 环境因子; 产卵场

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)12-1505-10

短吻红舌鲷(*Cynoglossus joyneri*)隶属于鲷形目(Pleuronectiformes)、舌鲷科(Cynoglossidae)、舌鲷属(*Cynoglossus*), 又称焦氏舌鲷、牛舌等^[1], 系亚热带及暖温带底层鱼类, 广泛分布于中国近海海域^[2], 于每年春末夏初时期在近岸浅水区产卵, 10 月左右至深水区越冬^[3]。海州湾是我国重要渔场之一, 同时也是多种鱼类的产卵场、索饵场、育幼场^[4]。近年来, 由于过度捕捞及气候等因素的变化, 该海域鱼类群落结构及生境均受到一定程度的影响^[5], 研究表明, 海州湾海域短吻红舌鲷的生态及经济地位不断提高^[6-9]。

鱼类早期补充群体是鱼类生活史上最脆弱的时期, 外界环境变化不可避免的影响其时空分布, 早期补充群体的生长与成活是资源补充群体结构

和数量的基础^[10-11], 其数量分布与变化不仅是反映鱼类产卵场动态的直接指标, 而且对于维持海洋生态系统的平衡也具有重要意义。国内外关于短吻红舌鲷的研究主要涉及摄食习性^[12-16]、资源量及分布^[17-21]、耳石微化学^[22]等方面, 有关产卵场生境适宜性的研究较少, 解析产卵场生境适宜性及其对环境变化的响应, 对于该鱼种资源的保护具有重要意义。因此, 亟待开展相关研究。

栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI)模型在描述物种时空分布与环境因子之间的关系方面可信度较高^[23-25], 并广泛应用于近海渔业资源评估及渔场预报等方面^[26-28]。环境因子相对重要性信息的缺乏使研究者在建立 HSI 模型时通常默认各变量权重相等, 然而, 不同生态因子

收稿日期: 2020-06-10; 修订日期: 2020-07-15.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFE0104400); 国家自然科学基金项目(31772852); 山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0501-2).

作者简介: 孙霄(1995-), 女, 硕士研究生, 从事渔业生态学研究. E-mail: sunx07102002@163.com

通信作者: 薛莹, 教授, 从事渔业生态学研究. E-mail: xueying@ouc.edu.cn

对生物的影响程度不同,因此,对不同变量赋予权重十分必要。Gong 等^[29]证明不同的加权方案会影响适宜生境的分布,但主观确定不同变量的权重可能对结果造成一定误差,Xue 等^[30]证明利用提升回归树(boosted regression tree, BRT)可以为环境变量权重的分配提供有效信息。

本研究根据 2014 年和 2016—2018 年 5—8 月海州湾及其邻近海域产卵场调查数据,分析不同月份短吻红舌鲷的产卵场生境适宜性及其与水温、盐度、水深、流速之间的关系,并比较不同算法下加权的栖息地模型,利用最优 HSI 模型预测短吻红舌鲷在海州湾的产卵场生境适宜性特征,以期为该鱼种的资源养护及管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

样品产自 2014 年和 2016—2018 年 5—8 月在海州湾及邻近海域进行的产卵场大面调查,调查

范围为 33.3°N~35.6°N, 119.0°E~122.0°E (图 1)。各月份具体调查时间及站位个数如表 1 所示。调查网具为带流量计的大型浮游生物网,网口直径 0.8 m,网目 0.505 mm,网衣 2.8 m。采样方式为水平拖网采样,拖曳时长 10 min,拖速 2.0 kn。在每个调查站位使用 CTD 同步测定水温、盐度、深度等环境因子,流速数据以 FVCOM 模型为基础,利用 ArcGIS 软件中克里金插值法获得。采集的样品用 5%的甲醛水溶液保存,利用形态学方法鉴定短吻红舌鲷鱼卵至种。以各站位对应鱼卵数量及滤水量数据为基础对短吻红舌鲷鱼卵丰度数据(RA)进行标准化处理,得到以(ind/100m³)为单位的标准化数据。

1.2 栖息地适宜性指数模型

首先,开发基于鱼卵丰度自然对数(lnRA)的适宜性指数(suitability index, SI),然后采用样条平滑函数,拟合环境变量与 SI 的关系。SI 的计算公式如下:

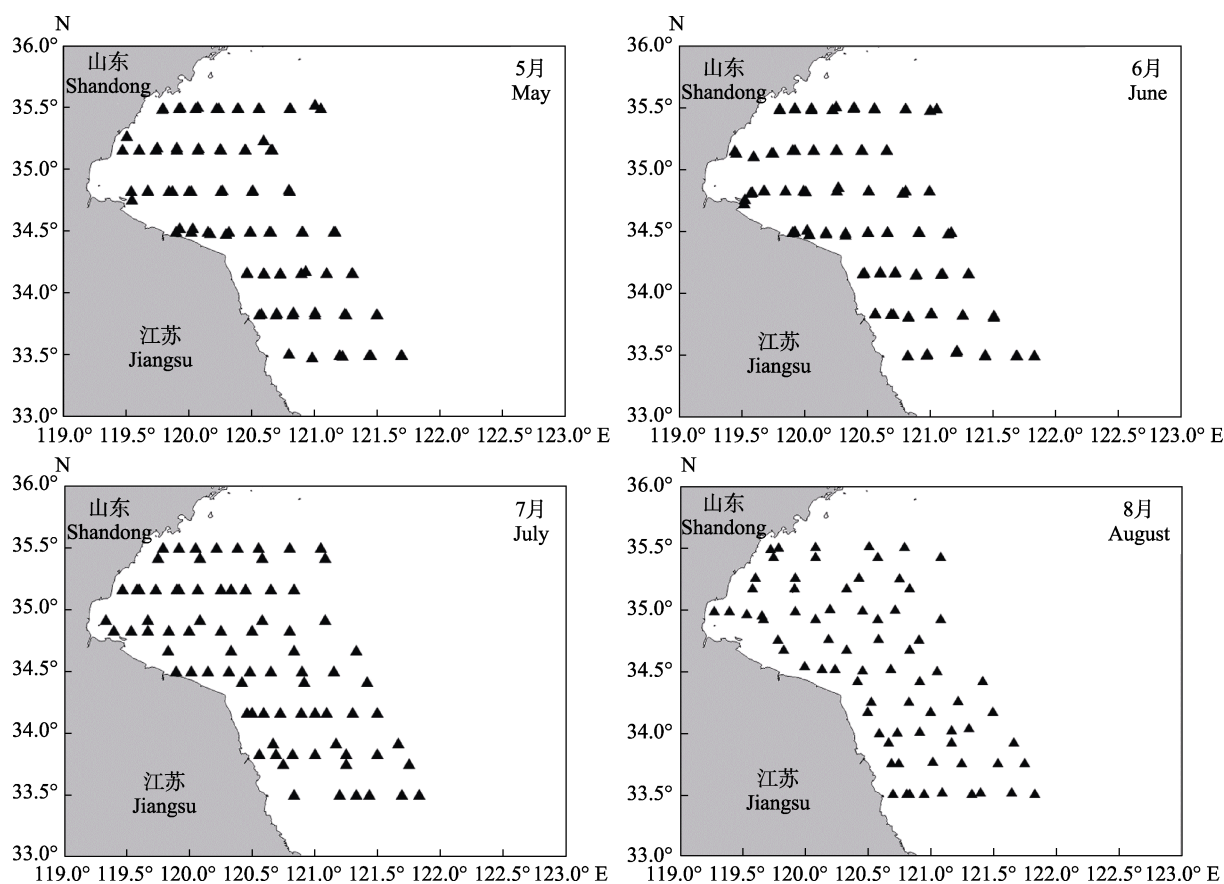


图 1 2014 年和 2016—2018 年 5—8 月海州湾及其邻近海域产卵场调查站位

Fig. 1 Survey stations of spawning ground in Haizhou Bay and adjacent waters from May to August in 2014 and 2016-2018

表 1 5—8 月海州湾及邻近海域产卵场调查时间及站位数

Tab. 1 Survey time and station number of spawning ground in Haizhou Bay and adjacent waters from May to August

月份 month	时间 year	站位个数 numbers of station
5 月 May	2017 年	48
	2018 年	46
6 月 June	2018 年 6 月上旬	49
	2018 年 6 月下旬	49
7 月 July	2016 年	32
	2018 年	47
8 月 August	2014 年	44
	2016 年	30

$$SI = \frac{\hat{Y} - \hat{Y}_{\min}}{\hat{Y}_{\max} - \hat{Y}_{\min}}$$

式中, $\hat{Y}$ 为经过样条平滑回归后的 $\ln RA$; $\hat{Y}_{\max}$ 与 $\hat{Y}_{\min}$ 分别为预测值中的最大值和最小值。SI 取值为 0~1.0 之间的连续数值。SI 值越接近 1.0 时表示适宜性指数越高, SI 值越接近 0 时表示意义则与上述描述相反。SI 值在 0.7~1.0 范围时, 则认为是最适宜的生境因子区间^[31]。

HSI 模型是由各个环境变量的 SI 值利用一定计算方法计算得到。本文选择两种常用的方法计算 HSI 模型, 即算数平均法(AMM)和几何平均法(GMM)。加权的 HSI 模型形式, 相关计算公式如下:

(a)加权的算数平均法模型

$$HSI = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i} \cdot \sum_{i=1}^n SI_i w_i$$

(b)加权的几何平均法模型

$$HSI = \left(\prod_{i=1}^n SI_i w_i \right)^{1/\sum_{i=1}^n w_i}$$

式中, HSI 为栖息地适宜性指数; n 为环境变量总个数; SI_i 为环境变量 i 的 SI 值; w_i 为环境变量 i 被赋予的权重, 权重越大, 表明该因子对产卵场生境适宜性的影响越大。

1.3 提升回归树模型

提升回归树模型(boosted regression tree, BRT)能够描述建模中的交互作用, 具有良好的预测

性^[32]。回归树算法能够有效处理缺失值, 并对异常值不敏感, 其建模对象几乎涵盖任何类型的预测变量^[33]。在 HSI 模型中, 每个环境变量的相对重要性可以通过 BRT 模型的总方差贡献率来评价, 即确定环境变量的权重^[30]。

1.4 模型的验证

采用交叉验证方法对上述两个模型的预测性能进行检验。随机选取 80% 的数据进行建模, 剩余 20% 的数据进行检验, 该过程重复 100 次, 以此过程评估模型的预测性能, 根据交叉验证中决定系数 R^2 、赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)指标选择各月份的最优模型。

1.5 HSI 分布图

本文结合 FVCOM 模型中相关变量数据对各月份产卵场分布进行预测, FVCOM 模型被广泛地应用于沿海及河口地区海岸环境的预测及管理。各月份产卵场的预测图利用 surfer 软件绘制。

上述分析均由 R3.2.5 软件完成, 其中 BRT 模型的构建利用 gbm 包实现。

2 结果与分析

2.1 环境因子的适宜性指数曲线

海州湾短吻红舌鲷产卵场适宜环境因子的范围存在一定的月间差异(图 2)。5—6 月短吻红舌鲷产卵生境适宜的表层水温范围相对较窄, 分别为 20.7~21.0 °C 和 24.1~25.0 °C; 7—8 月适宜的表层水温范围较大, 分别为 24.2~30.0 °C 和 26.2~29.2 °C。5 月对应的最适底层水温为 20.2~20.7 °C, 6 月为 22.2~24.4 °C, 7 月为 20.0~25.5 °C, 8 月为 27.0~29.5 °C。5 月最适的表层盐度范围为 22.4~30.0, 6 月为 26.0~26.7, 7 月为 19.0~29.0, 8 月为 21.9~22.4。5—8 月最适水深范围在 6~9 m 以浅海域。5—7 月最适流速范围均在 0.025 m/s 以下, 8 月在 0.040 m/s 以下。

2.2 环境因子的权重

利用 BRT 模型对不同月份短吻红舌鲷产卵场的表层水温、底层水温、表层盐度、水深及流速分别赋予权重(图 3)。5 月对短吻红舌鲷产卵场生境适宜性总偏差贡献率解释最大的是底层水温, 贡献率为 38.17%, 其次是表层水温(36.81%)、流

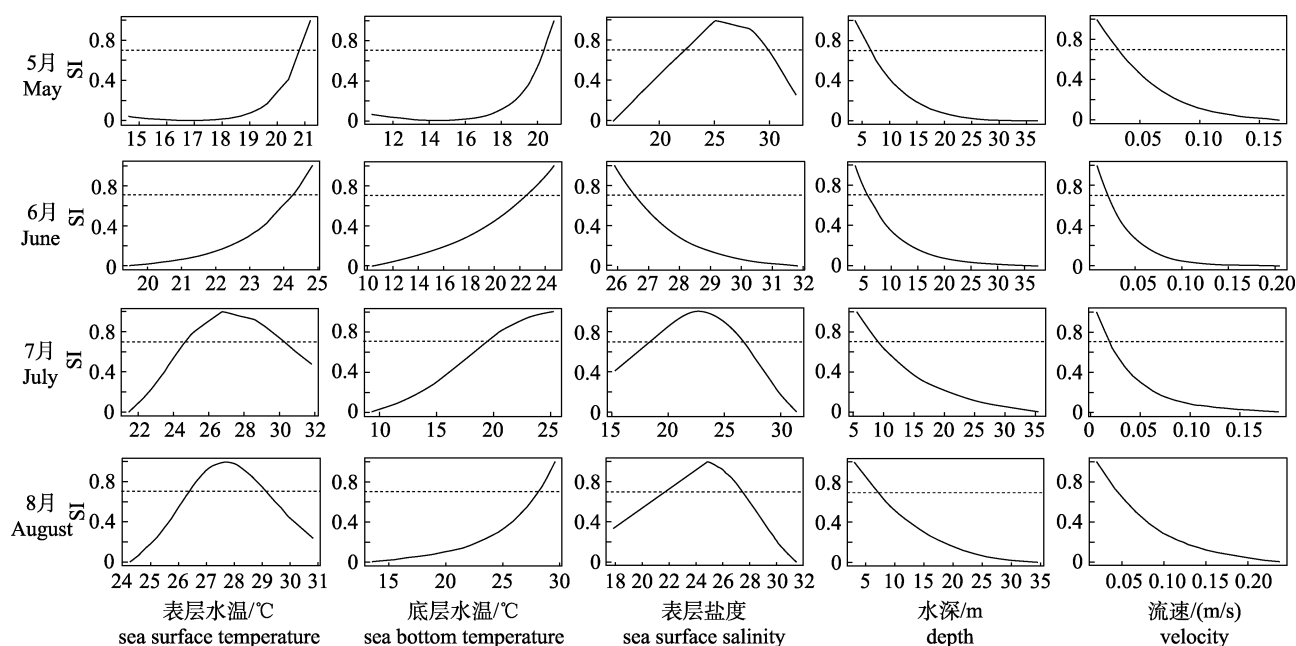


图 2 海州湾及其邻近海域 5—8 月短吻红舌鲷产卵场生境适宜性指数曲线

Fig. 2 Suitability index curve of spawning ground for *Cynoglossus joyneri* in Haizhou Bay and adjacent waters from May to August

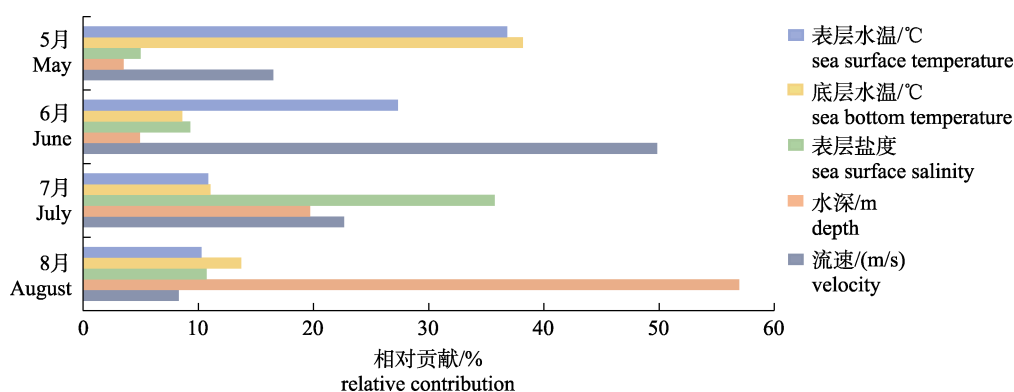


图 3 基于提升回归树模型的海州湾及其邻近海域 5—8 月各个环境因子对短吻红舌鲷产卵场生境适宜性的相对贡献率

Fig. 3 Relative contribution (%) of different environmental variables to the total deviance explained by the boosted regression tree (BRT) models of distribution of spawning grounds of *Cynoglossus joyneri* in Haizhou Bay and adjacent waters from May to August

速(16.50%)、表层盐度(5.00%)和水深(3.52%); 6 月对其产卵场生境适宜性总偏差贡献率解释最大的是流速(49.84%), 其次为表层水温(27.32%)、表层盐度(9.31%)、底层水温(8.60%)和水深(4.93%); 7 月对其产卵场生境适宜性总偏差贡献率解释最大的是表层盐度(35.73%), 其次是流速(22.65%)、水深(19.71%)、底层水温(11.06%)、表层水温(10.85%)。8 月对其产卵场生境适宜性总偏差贡献率解释最大的是水深(56.97%), 其次是底层水温

(13.72%)、表层盐度(10.72%)、表层水温(10.27%)和流速(8.32%)(图 3)。

2.3 基于 AMM 与 GMM 算法的 HSI 模型

利用交叉验证方法中 R^2 及 AIC 指标对模型的预测性能进行评估。结果显示 AMM 算法与 GMM 算法的 HSI 模型在不同月中预测性能表现不同(表 2), 5 月、7 月中 GMM 算法表现较好, HSI 模型具有较高的 R^2 值及较低的 AIC 值; 6 月、8 月中 AMM 算法表现较好, HSI 模型的 R^2 值较高, AIC

值较低。结合上述交叉验证中指标的表现, 不同月份应分别选择适宜的 HSI 模型用于短吻红舌鲷产卵场生境适宜性的研究。

表 2 基于算数平均法和几何平均法的
HSI 模型交叉验证结果
Tab. 2 Cross-validation results of HSI model
based on arithmetic mean model (AMM)
and geometric mean model (GMM)

月份 month	HSI 模型	R^2	AIC
5 月 May	AMM	0.432	26.124
	GMM	0.487	25.187
6 月 June	AMM	0.322	39.566
	GMM	0.282	40.033
7 月 July	AMM	0.401	35.732
	GMM	0.430	35.363
8 月 August	AMM	0.507	34.613
	GMM	0.421	35.220

2.4 HSI 的空间分布

利用不同月份最优的 HSI 模型对海州湾短吻红舌鲷产卵场生境适宜性的预测结果如图 4 所示。分析发现, 5 月, 海州湾及其邻近海域短吻红舌鲷产卵海域主要分布在 121.5°E 以西, 34.0°N 以南海域(图 4), 适宜的产卵场生境($HSI \geq 0.7$)占研究海域总面积的 3.115%(图 5); 6 月, 适宜的产卵场生境面积较小, 仅占研究海域面积的 0.250%, 且整体呈现沿岸向北移的趋势; 7—8 月, 适宜的产卵场生境也呈现沿岸北移的趋势, 但与 5—6 月相比面积有所扩大, 适宜的产卵场生境占比分别为 4.764%和 11.799%, 且在 34.0°N 以南海域中适宜的产卵场生境面积占比较高。此外, 各个月中预测的海州湾短吻红舌鲷产卵场生境适宜性与实际调查中相对资源密度的分布大致相符(图 4)。

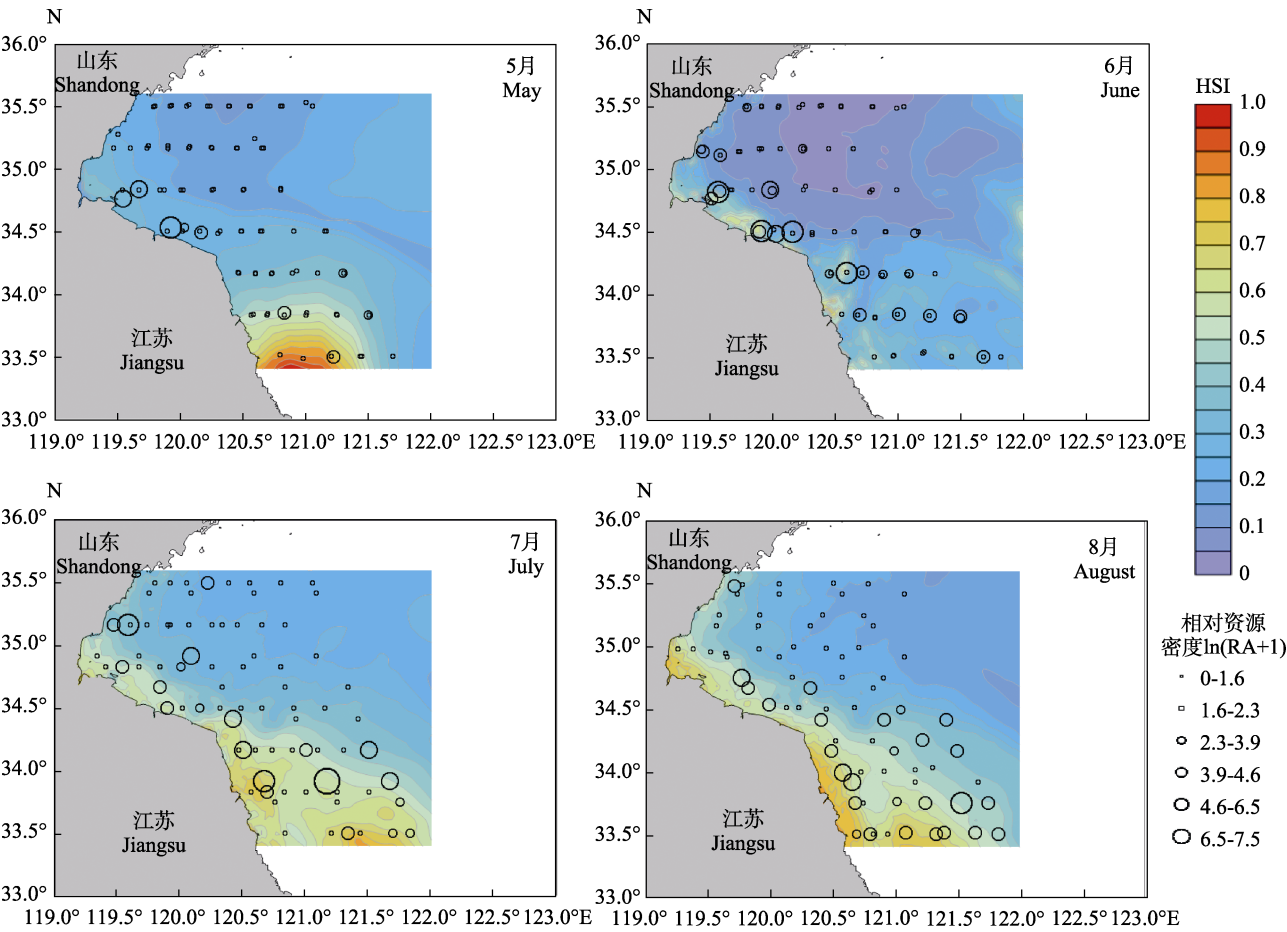


图 4 基于 HSI 模型预测的 5—8 月海州湾及其邻近海域短吻红舌鲷产卵场生境适宜性与实际鱼卵密度的叠加图

Fig. 4 Overlapping maps of prediction and observations spatial distribution of spawning ground of *Cynoglossus joyneri* in Haizhou Bay and adjacent waters from May to August based on HSI

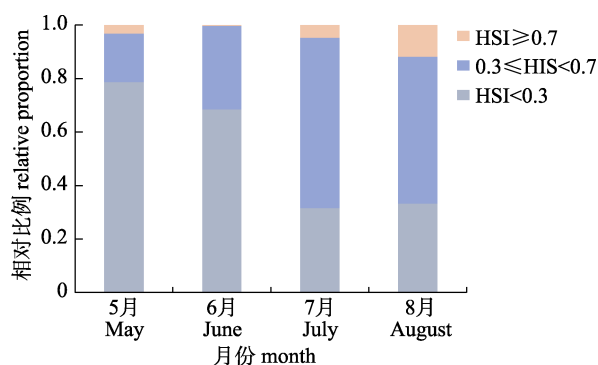


图 5 海州湾及其邻近海域 5—8 月短吻红舌鲷产卵场生境适宜性的相对比例

HSI < 0.3 表示低质量产卵生境; 0.3 ≤ HSI < 0.7 表示中等质量产卵生境; HSI ≥ 0.7 表示高质量产卵生境。

Fig. 5 Relative proportion of habitat suitability for spawning ground of *Cynoglossus joyneri* in Haizhou Bay and adjacent waters from May to August

HSI < 0.3 means low quality spawning habitat; 0.3 ≤ HSI < 0.7 means medium quality spawning habitat; HSI ≥ 0.7 means high quality spawning habitat.

3 讨论

3.1 影响短吻红舌鲷产卵场生境适宜性的因素

水温、盐度、水深、海流等外部环境因素均会影响鱼类产卵场的分布^[34]。本研究, BRT 模型的计算结果显示, 不同月份环境因子对短吻红舌鲷产卵场分布的影响程度不同(图 3)。春季(5月), 水温是影响短吻红舌鲷产卵场分布的主要因素, 该时期海水温度整体偏低, 对短吻红舌鲷的性腺发育及洄游产生制约作用。而随着夏季(6—8月)水温的逐渐升高, 亲体的适宜海域范围逐渐扩大, 水温对产卵场分布的限制逐渐降低。该结果与万瑞景等^[35]对黄海区鱼类产卵场分布与转移受温度增长与分布影响的结论相符。夏季, 短吻红舌鲷产卵场的生境适宜性受(除温度外)其他因子的影响较大。6月, 流速(49.84%)对产卵场分布的影响最大, 说明流速可能通过影响鱼卵的分散与聚集间接影响亲体对产卵场的选择, 刘志亮等^[36]研究中确定的山东南部近岸海域夏季出现的稳定低频北向流可能是间接影响该时期产卵场分布的原因。此外, 鱼卵本身在未孵化前要经历被水流挟带被动扩散的过程, 其分布特征与水域形态及其水动力学特征密切相关^[37]。7月, 表层盐度是影响产卵场分布的主要因素, 盐度在鱼类生活

史中发挥重要作用, 鱼类在不同发育阶段(如受精、孵化、产卵等)的发育时间和发育速度都与海水盐度的高低密切相关^[38-39]。另外, 受季风影响, 夏季海州湾入海河流的径流量增大^[40], 近岸海域盐度降低, 而该时期适宜盐度范围较低(图 2), 说明低盐水域更利于亲体产卵。8月, 水深对产卵场生境适宜性的影响最大, 海水深度对不同时间及空间的各种水文要素有综合性的影响^[41]; 此外, 亲体产卵水深的变化对鱼卵存活率的高低有较大影响^[42]。

5—8月, 短吻红舌鲷产卵场适宜水温均在 20.0~30.0 °C 范围内, 整体较高(图 2); 适宜盐度范围整体偏低, 为 19.0~30.0, 与杨东莱等^[43]对渤海海域短吻红舌鲷鱼卵适宜温、盐的研究结果基本一致(水温为 20.0~29.0 °C, 盐度为 20.0~33.0)。适宜水温较高符合短吻红舌鲷暖温性的适温属性, 有利于其鱼卵孵化及性腺发育。另外, 该鱼种产卵生境适宜水深范围较集中, 均在 9 m 等深线以浅海域, 与李增光^[5]判断海州湾夏季短吻红舌鲷鱼卵聚集类型为近岸和湾中部聚集的结论相符, 也与 Minami^[44]分析若狭湾短吻红舌鲷早期资源多分布于浅海水域的研究结果一致。另外, 水深并不直接影响产卵场的生境适宜性, 但会通过影响繁殖亲体、饵料分布和其他理化因素间接影响。适宜流速整体较低, 均在 0.05 m/s 以下, 春夏季各月份 SI 均与流速呈负相关关系, 说明鱼卵密度在低流速区较密集, 该结果与徐薇等^[45]的研究结果相一致。

3.2 海州湾及其邻近海域短吻红舌鲷产卵场的分布特征

海州湾及其邻近海域短吻红舌鲷产卵场的分布特征存在一定季节变化。春季, 适宜产卵的生境集中分布在 34.0°N 以南海域(图 4), 春末夏初海域水温开始回升但整体表现为南部海域水温高于北部海域, 此时南部海域的较高的水温更符合产卵亲体的需求。夏季, 适宜产卵的生境范围多分布于近岸浅水区且有北扩散的趋势, 一方面可能是夏季近岸浅水区形成较强的潮汐锋致使鱼卵分布多聚集于近岸^[46], 另一方面水温的升高促使亲体向高纬度地区扩散。与其他月份相比, 6月适

宜产卵的生境范围在近岸海域分布较分散, 夏初时期形成的从南至北流向的暖水舌可能使该鱼种鱼卵分布较分散^[47], 另一方面与 7 月、8 月相比, 亲体产卵量相对较小, 也可能是造成其适宜生境分布较少的原因之一。在 HSI 模型中, HSI 值的大小取决于各变量的 SI, 但单个变量最高的 SI 并不意味着最高的 HSI, 因为其他变量的 SI 不一定最大; 而 6 月各环境因子适宜范围较其他月更窄(图 2), 这可能是造成该月产卵适宜生境($HSI \geq 0.7$) 占比较其他月份低(图 5)的原因。

3.3 HSI 模型的构建

HSI 模型在评价栖息地指数方面是使用最广泛的模型之一。本研究通过选取最优算法来建立各个月的 HSI 模型, 取得了较好的预测效果。算数平均法与几何平均法是 HSI 模型常用的两种算法, 但两种算法存在不同的优势, 其中算术平均法估算结果较为稳定, 不易受 SI 极值的影响, 而几何平均法受单因素 SI 值偏大或偏小的影响^[48], 因此, HSI 建模方法应根据不同月和 SIs 值的分布情况而定, 这也与邹易阳等^[27]对海州湾小黄鱼的研究结论相符。另外, 生物对环境因子的响应总是处于变化之中, 因此采用 BRT 模型计算不同环境因子的相对贡献, 既能体现出同一时期不同环境因子对短吻红舌鲷产卵适宜生境的影响程度, 也能体现出不同时期同一环境因子影响程度的变化。加权 HSI 模型的预测性能相对较好^[30], 但在模型构建时应注意丰度数据的形式, 因为异常大的丰度数据会降低模型性能, 对模型的预测效果产生负影响。基于加权的 HSI 模型预测的海州湾短吻红舌鲷产卵场适宜生境的分布与其实际资源量的分布趋势一致(图 4), 因此, 加权 HSI 模型能够准确预测该海域短吻红舌鲷产卵场的适宜生境。

影响产卵场生境适宜性的因素有很多, 除上述因素外, 溶解氧、pH、叶绿素 a、营养盐等环境因素也存在影响^[49], 特别是鱼卵阶段的移动为被动运输, 多受海流等条件的影响。因此, 在今后的模型的分析与研究中, 应全面综合考虑重要因素的影响, 提高产卵场适宜生境的判定精确性, 以期更加全面客观地解析短吻红舌鲷资源的补充

过程与种群的动态变化。

参考文献:

- [1] Cheng Q T, Zhou C W. Ichthyography of Shandong[M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1997. [成庆泰, 周才武. 山东鱼类志[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1997.]
- [2] Chen D G, Zhang M Z. Marine Fishes of China[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2016. [陈大刚, 张美昭. 中国海洋鱼类[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2016.]
- [3] Jin X S, Zhao X Y, Meng T X. Biological Resources and Habitation Environment in Yellow Sea and Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 2005: 327-341. [金显仕, 赵宪勇, 孟田湘. 黄、渤海生物资源与栖息环境[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 327-341.]
- [4] Su W, Xue Y, Zhang C L, et al. Spatio-seasonal patterns of fish diversity, Haizhou Bay, China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, 33(1): 121-134.
- [5] Li Z G. Distribution of main species of stow net in the south Yellow Sea based on GAM and preliminary study of characteristics of ichthyoplankton assemblages in Haizhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. [李增光. 基于 GAM 模型的南黄海帆张网主要渔获物分布及海州湾鱼卵、仔稚鱼集群特征的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.]
- [6] Ren X M, Xu B D, Zhang C L, et al. The composition of and variations in the trophic guilds of fish assemblages in Haizhou Bay and adjacent waters[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(1): 141-150. [任晓明, 徐宾铎, 张崇良, 等. 海州湾及邻近海域鱼类群落的营养功能群及其动态变化[J]. 中国水产科学, 2019, 26(1): 141-150.]
- [7] Zhang B, Yuan W, Wang J. Feeding ecology of the dominant fish species in spring in Laoshan Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(4): 820-827. [张波, 袁伟, 王俊. 崂山湾春季鱼类群落的摄食生态及其主要种类[J]. 中国水产科学, 2015, 22(4): 820-827.]
- [8] Ma Q Y, Han D Y, Liu H, et al. Construction of a continuous trophic spectrum for the food web in Jiaozhou bay using stable isotope analyses[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): 7207-7218. [麻秋云, 韩东燕, 刘贺, 等. 应用稳定同位素技术构建胶州湾食物网的连续营养谱[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 7207-7218.]
- [9] Zeng H H, Xu B D, Xue Y, et al. Study on fish species composition and seasonal variation in the shallow waters of Jiaozhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(1): 67-74. [曾慧慧, 徐宾铎, 薛莹, 等. 胶州湾浅水区鱼类种类组成及其季节变化[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(1): 67-74.]

- [10] Gao Y J. Studies on community structure of ichthyoplankton in Laizhou Bay[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016. [高彦洁. 莱州湾海域鱼卵仔稚鱼群落结构初步研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.]
- [11] Chen D G. Fishery Resources Biology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997. [陈大刚. 渔业资源生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.]
- [12] Luo B Z, Wei S, Dou S Z. Study on food web and trophic structure of fish in the Changjiang River Estuary[M]//Studia Marina Sinica. Beijing: Science Press, 1997, 38: 143-153. [罗秉征, 韦晟, 窦硕增. 长江口鱼类食物网与营养结构的研究[M]//海洋科学集刊. 北京: 科学出版社, 1997, 38: 143-153.]
- [13] Yang J M. A study on food and trophic levels of Baohai Sea fish[J]. Modern Fisheries Information, 2001, 16(10): 10-19. [杨纪明. 渤海鱼类的食性和营养级研究[J]. 现代渔业信息, 2001, 16(10): 10-19.]
- [14] Dou S Z, Yang J M, Chen D G. Food habits of stone flounder, spotted flounder, high-eyed flounder and red tongue sole in the Beihai Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 1992, 16(2): 162-166. [窦硕增, 杨纪明, 陈大刚. 渤海石鲽、星鲽、高眼鲽及焦氏舌鳎的食性[J]. 水产学报, 1992, 16(2): 162-166.]
- [15] Zhang B. Feeding ecology of fishes in the Bohai Sea[J]. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(3): 11-22. [张波. 渤海鱼类的食物关系[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(3): 11-22.]
- [16] Wei S, Jiang W M. Study on food web of fishes in the Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1992, 23(2): 182-192. [韦晟, 姜卫民. 黄海鱼类食物网的研究[J]. 海洋与湖沼, 1992, 23(2): 182-192.]
- [17] Liu X Z, Li Y P, Fu J, et al. The preliminary investigation on status of fishery resources off Changxing Island in summer [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2011, 26(6): 565-568. [刘修泽, 李铁平, 付杰, 等. 长兴岛周边海域夏季渔业资源现状初步调查[J]. 大连海洋大学学报, 2011, 26(6): 565-568.]
- [18] Liu Y, Shen C C, Ma C, et al. Species composition and quantitative distribution of fishes in spring and autumn in Jiulongjiang Estuary[J]. Journal of Fujian Fisheries, 2014, 36(3): 191-197. [刘勇, 沈长春, 马超, 等. 九龙江口春秋季节鱼类种类组成及数量分布特征[J]. 福建水产, 2014, 36(3): 191-197.]
- [19] Wang M, Hong B, An C G, et al. Diversity and density distribution of fishery resources in Northeast of Hangzhou Bay during flood and drought seasons[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2016, 25(2): 246-254. [王森, 洪波, 安传光, 等. 丰、枯水期杭州湾东北部渔业资源多样性及数量分布[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(2): 246-254.]
- [20] Zhang H, Yang S L, Zhang S M, et al. Seasonal changes of fish community composition and abundance in the northeast Dongtan Wetland in the Yangtze Estuary[J]. Marine Fisheries, 2016, 38(4): 374-382. [张衡, 杨胜龙, 张胜茂, 等. 长江口东滩湿地东北水域鱼类群落种类组成和丰度的季节变化[J]. 海洋渔业, 2016, 38(4): 374-382.]
- [21] Wang M, Hong B, Zhang Y P, et al. Spring and summer fish community structure in Northern Hangzhou Bay[J]. Journal of Hydroecology, 2016, 37(5): 75-81. [王森, 洪波, 张玉平, 等. 春季和夏季杭州湾北部海域鱼类种群结构分析[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(5): 75-81.]
- [22] Liu H B, Jiang T, Qiu C, et al. Otolith microchemistry of four fish species from the Changjiang River estuary, China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(6): 1358-1364. [刘洪波, 姜涛, 邱晨, 等. 长江口水域四种鱼类的耳石微化学研究[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(6): 1358-1364.]
- [23] Wang Y F, Chen X J. Comparisons of habitat suitability index models of skipjack tuna in the Western and Central Pacific Ocean[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2017, 26(5): 743-750. [王易帆, 陈新军. 中西太平洋鲣栖息地指数预报模型比较研究[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(5): 743-750.]
- [24] Yu W, Chen X J. Ocean warming-induced range-shifting of potential habitat for jumbo flying squid *Dosidicus gigas* in the Southeast Pacific Ocean off Peru[J]. Fisheries Research, 2018, 204: 137-146.
- [25] 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.]
- [26] Fan J T, Chen G B, Chen Z Z. Forecasting fishing ground of calamary in the northern South China Sea according to habitat suitability index[J]. South China Fisheries Science, 2017, 13(4): 11-16. [范江涛, 陈国宝, 陈作志. 基于栖息地指数的南海北部枪乌贼渔情预报模型构建[J]. 南方水产科学, 2017, 13(4): 11-16.]
- [27] Zou Y Y, Xue Y, Ma Q Y, et al. Spatial distribution of *Larimichthys polyactis* in Haizhou Bay based on habitat suitability index[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(8): 54-63. [邹易阳, 薛莹, 麻秋云, 等. 应用栖息地适宜性指数研究海州湾小黄鱼的空间分布特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(8): 54-63.]
- [28] Hüssy K, Hinrichsen H H, Huwer B. Hydrographic influence on the spawning habitat suitability of western Baltic cod

- (*Gadus morhua*)[J]. ICES Journal of Marine Science, 2012, 69(10): 1736-1743.
- [29] Gong C X, Chen X J, Gao F, et al. Importance of weighting for multi-variable habitat suitability index model: A case study of winter-spring cohort of *Ommastrephes bartramii* in the Northwestern Pacific Ocean[J]. Journal of Ocean University of China, 2012, 11(2): 241-248.
- [30] Xue Y, Guan L S, Tanaka K, et al. Evaluating effects of rescaling and weighting data on habitat suitability modeling[J]. Fisheries Research, 2017, 188: 84-94.
- [31] Brooks R P. Improving habitat suitability index models[J]. Wildlife Society Bulletin, 1997, 25(1): 163-167.
- [32] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees[J]. Journal of Animal Ecology, 2008, 77(4): 802-813.
- [33] Compton T J, Morrison M A, Leathwick J R, et al. Ontogenetic habitat associations of a demersal fish species, *Pagrus auratus*, identified using boosted regression trees[J]. Marine Ecology Progress Series, 2012, 462: 219-230.
- [34] Zheng Y J, Chen X Z, Cheng J H, et al. Biological Resources and Environment on the Continental Shelf of the East China Sea[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2003. [郑元甲, 陈雪忠, 程家骅, 等. 东海大陆架生物资源与环境[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.]
- [35] Wan R J, Jiang Y W. Studies on the ecology of eggs and larvae of Osteichthyes in the Yellow Sea[J]. Marine Fisheries Research, 1998(1): 60-73. [万瑞景, 姜言伟. 黄海硬骨鱼类鱼卵、仔稚鱼及其生态调查研究[J]. 海洋水产研究, 1998(1): 60-73.]
- [36] Liu Z L, Hu D X. Preliminary study on the Huanghai Sea coastal current and its relationship with local wind in summer[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(2): 1-7. [刘志亮, 胡敦欣. 黄海夏季近岸海区环流的初步分析及其与风速的关系[J]. 海洋学报(中文版), 2009, 31(2): 1-7.]
- [37] Cao W X, Chang J B, Qiao Y. Fish Resources of Early Life History Stages in Yangtze River[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. [曹文宣, 常剑波, 乔晔. 长江鱼类早期资源[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.]
- [38] Xu M. Effects of salinity and alkalinity on sperm motility, fertilization rate and hatching rate of 3 fish species[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015. [徐敏. 盐碱度对 3 种鱼精子活力、受精率及孵化率的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.]
- [39] Wang Y F, Zhu X H. A review on impact of salinity on patterns of fish ecophysiology[M]//Studia Marina Sinica. Beijing: Science Press, 2002, 44: 151-158. [王云峰, 朱鑫华. 盐度对鱼类生态生理学特征的影响[M]//海洋科学集刊. 北京: 科学出版社, 2002, 44: 151-158.]
- [40] Yu J C, Li N, Zhang S, et al. Water environment carrying capacity of Haizhou Bay marine ranching[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 1993-2003. [俞锦辰, 李娜, 张硕, 等. 海州湾海洋牧场水环境的承载力[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1993-2003.]
- [41] Chen X J. Fishery Resources and Fishing Ground[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004. [陈新军. 渔业资源与渔场学[M]. 北京: 海洋出版社, 2004.]
- [42] Li Y S, Pan L Z, Chen X J. Effects of spawning water depth on transport and survival of chub mackerel (*Scomber japonicus*) eggs and larvae in the East China Sea[J]. Marine Fisheries, 2013, 35(2): 176-182. [李曰嵩, 潘灵芝, 陈新军. 产卵深度变动对东海日本鲭鱼卵仔幼鱼输运和存活率的影响[J]. 海洋渔业, 2013, 35(2): 176-182.]
- [43] Yang D L, Wu G Z, Pang H Y. Seasonal distribution of eggs and larvae of tongue sole *Cynoglossus semilaevis günther* and *C. joyneri günther* in Bohai Bay[J]. Chinese Journal of Ecology, 1984(3): 30-33. [杨东莱, 吴光宗, 庞鸿艳. 渤海湾的半滑舌鲷及焦氏舌鲷的鱼卵和仔、稚鱼的季节分布[J]. 生态学杂志, 1984(3): 30-33.]
- [44] Minami T. The early life history of a tongue fish *Cynoglossus joyneri*[J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 1983, 49(5): 719-724. [南卓志. アカシタビラメの初期生活史[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1983, 49(5): 719-724.]
- [45] Xu W, Liu H G, Tang H Y, et al. Effects of ecological operation of Three Gorges Reservoir on fish eggs and larvae in Shashi Section of the Yangtze River[J]. Journal of Hydroecology, 2014, 35(2): 1-8. [徐薇, 刘宏高, 唐会元, 等. 三峡水库生态调度对沙市江段鱼卵和仔鱼的影响[J]. 水生生态学杂志, 2014, 35(2): 1-8.]
- [46] Wei H, Wang Y H, Wan R J, et al. Tidal front and the convergence of anchovy (*Engraulis japonicus*) eggs in the Yellow Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(3): 512-516. [魏皓, 王玉衡, 万瑞景, 等. 黄海锋区环流与鲆鱼卵的聚集[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(3): 512-516.]
- [47] Shi X M, Huang L. Analysis of seasonal variation of salt-temperature distribution in south yellow sea[J]. Science & Technology Vision, 2019(32): 26-29, 37. [石晓梦, 黄磊. 南黄海温盐水平分布季节变化分析[J]. 科技视界, 2019(32): 26-29, 37.]
- [48] 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.]

- [49] Xiao Y Z, Wang R, Ou Q, et al. Relationship between abundance distribution of fish eggs, larvae and juveniles and environmental factors in the Pearl River Estuary waters in

spring[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2010, 29(4): 488-495. [肖瑜璋, 王蓉, 欧强, 等. 春季珠江口水域鱼卵和仔稚鱼的分布及其与环境因子的关系[J]. 台湾海峡, 2010, 29(4): 488-495.]

Habitat suitability of *Cynoglossus joyneri* spawning grounds in Haizhou Bay and adjacent waters

SUN Xiao¹, ZHANG Yunlei¹, XU Binduo^{1,3}, ZHANG Chongliang^{1,3}, REN Yiping^{1,2,3}, XUE Ying^{1,3}

1. Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;
2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China;
3. Field Observation and Research Station of Haizhou Bay Fishery Ecosystem, Ministry of Education, Qingdao 266003, China

Abstract: Fish eggs could significantly impact fish population recruitment. The distribution and variation in the number of fish eggs impacts the dynamics of the spawning ground, which is fundamental for maintaining marine ecosystem balance. Haizhou Bay is an important fishing ground in China, and it is also an important spawning and nursery ground for various fishes. Recently, owing to the impact of overfishing and other factors, the fish community structure in Haizhou Bay changed considerably. Presently, *Cynoglossus joyneri* is a dominant and important economic species in Haizhou Bay and adjacent waters. Based on survey data in the spawning grounds of this area from May to August in 2014 and 2016–2018, a habitat suitability index (HSI) model of *C. joyneri* eggs was constructed to analyze its spawning habitat characteristics. A boosted regression tree (BRT) model was used to evaluate the weight of each environmental variable in each month, including sea surface temperature, sea bottom temperature, sea surface salinity, depth, and velocity data. The arithmetic mean model (AMM) and geometric mean model (GMM) were used to build the HSI model, and the model fitness was evaluated by cross-validations. Results showed that the range of environmental factors of *C. joyneri* suitable spawning habitat was similar in different months, but the weights of environmental factors changed considerably. Cross-validation showed that the GMM performed better in May and July, whereas the AMM produced a better estimation in June and August. *Cynoglossus joyneri* spawning ground distribution varied in different months, and was mainly distributed in the south of the research area in May, and moved northward from June to August. The scope of distribution also expanded gradually. The results showed that the HSI model could be used to reflect the distribution and variations of *C. joyneri* spawning grounds in Haizhou Bay and adjacent waters. Therefore, different protective measures could be formulated for reproductive parents and juveniles of *C. joyneri* according to the conditions of suitable habitats in different months, and consequently could be valuable for understanding supplementary mechanisms and determining effective management measures for *C. joyneri*.

Key words: habitat suitability index; *Cynoglossus joyneri*; fish eggs; environmental factors; spawning ground

Corresponding author: XUE Ying. E-mail: xueying@ouc.edu.cn