

DOI: 10.12264/JFSC2021-0532

黄河口近岸海域鲎鱼卵、仔稚鱼分布及其与环境因子的关系

牛明香^{1,2}, 左涛^{1,2}, 王俊^{1,2}, 陈瑞盛¹, 张家旭³

1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东省渔业资源与生态环境重点实验室, 山东 青岛 266071;
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237;
3. 东营市自然资源和规划局东营港经济开发区分局, 山东 东营 257020

摘要: 为了解黄河口近岸海域鲎(*Liza haematocheila*)鱼卵、仔稚鱼的分布, 并探究环境因子对其分布的影响, 根据2020年4—7月在黄河口近岸海域的产卵场调查和2020年4—11月的定置网渔业生产调查, 结合水温遥感数据, 分析了鲎的产卵期和鱼卵、仔稚鱼的空间分布特征, 并利用广义可加模型(generalized additive model, GAM)研究了鱼卵、仔稚鱼分布与海洋环境因子之间的关系。结果显示, 4—5月为黄河口近岸海域鲎的繁殖盛期, 鱼卵集中分布在莱州湾近岸水域, 仔稚鱼在莱州湾和黄河入海口门水域均有分布。水温对鱼卵、仔稚鱼的分布和丰度都有重要影响, 11~14 °C和19~22 °C范围内, 鲎鱼卵、仔稚鱼出现概率和丰度均较为集中; 盐度与鱼卵、仔稚鱼分布关系密切, 但对丰度影响不显著; 2~6 m水深范围内, 鱼卵、仔稚鱼分布最为集中, 随着水深增加, 鱼卵、仔稚鱼出现概率降低。本研究结果为鲎资源养护和管理提供了科学依据。

关键词: 黄河口; 鲎; 鱼卵; 仔稚鱼; 时空分布; 环境因子; 广义可加模型; 遥感

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)03-0377-11

鱼卵、仔稚鱼是海洋鱼类资源补充和可持续利用的基础^[1-2], 其数量分布和变化对维持海洋生态系统的平衡具有重要意义^[3-4]。作为鱼类早期的补充群体, 鱼卵、仔稚鱼是鱼类生活史中最脆弱的阶段, 其时空分布与海洋环境因子密切相关, 且对环境变化极为敏感, 海洋环境的细微变化可能对其产生重大影响^[5]。研究人员对渤海、黄河口和莱州湾鱼卵、仔稚鱼种类组成、数量分布和生物多样性等方面进行了研究^[1,6-8]。有关黄河口水域鱼卵、仔稚鱼分布与环境关系研究方面, 秦雪等^[9]分析了黄河口水域春、夏季鱼卵、仔稚鱼优势种分布与海表温度、盐度的关系, 结果表明, 优势种鱼卵、仔稚鱼分布与水温关系明显, 而与盐度关系不显著。

鲎(*Liza haematocheila*)隶属于鲷形目(Mugiliformes), 鲷科(Mugilidae), 鲎属^[10], 常栖息于河口港湾, 亦进入淡水生活, 主要以有机碎屑为食^[11]。鲎为近海沿岸经济鱼类, 我国沿海均产, 以黄、渤海群产量较大^[12]。鲎是黄河口水域重要的经济渔业对象, 周年内做短距离洄游, 每年春季在浅海或河口咸淡水区产卵, 孵化仔鱼随着潮汐进入沿岸生长, 随着水温下降, 洄游入渤海深水区越冬。目前关于鲎的研究主要涉及年龄与生长^[13-14]、摄食^[15-16]、繁殖习性^[17]等, 而有关黄河口近岸鲎鱼卵、仔稚鱼分布的研究尚未见报道。本研究根据2020年在黄河口近岸海域产卵场调查和定置网渔业生产数据, 分析了鲎的产卵期、鱼卵和仔稚鱼的时空分布, 并基于GAM模型, 结合水温遥感数

收稿日期: 2021-11-06; 修订日期: 2022-02-09.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901201, 2019YFD0901202); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2018HY-ZD0102).

作者简介: 牛明香(1977-), 女, 副研究员, 研究方向为海洋渔业遥感及GIS应用. E-mail: niuwx@ysfri.ac.cn

通信作者: 王俊, 研究员, 研究方向为资源增殖养护. E-mail: wangjun@ysfri.ac.cn

据,研究了环境因子对其分布的影响,以期为鲎资源养护和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源及处理

1.1.1 鱼卵、仔稚鱼及定置网数据 租用渔业生产船只,于 2020 年 4—7 月在黄河口及近岸海域(119°00'E~119°25'E、37°20'N~38°05'N)开展产卵场调查,调查站位分布见图 1,具体调查时间及采样站位数量见表 1。调查网具为大型浮游生物网,网口内径 0.8 m,网身孔径 0.5 mm,网口面积 0.5 m²。采用表层水平拖网采样,拖曳时间长 10 min,拖速 2.0 kn 左右。采集的样品用 5%的甲醛水溶液保存,带回实验室,利用形态学方法在解剖镜下进行种类鉴定,并计数。样品的采样、固定和数据处理均按照《海洋调查规范第 6 部分:海洋生物调查》(GB/T 12763.6-2007)进行。将鲎鱼卵、仔稚鱼数据进行统计,以每网鲎鱼卵、仔稚鱼的实际数量(粒、尾)为指标计算鲎鱼卵、仔稚鱼的密度(粒或尾/网)。

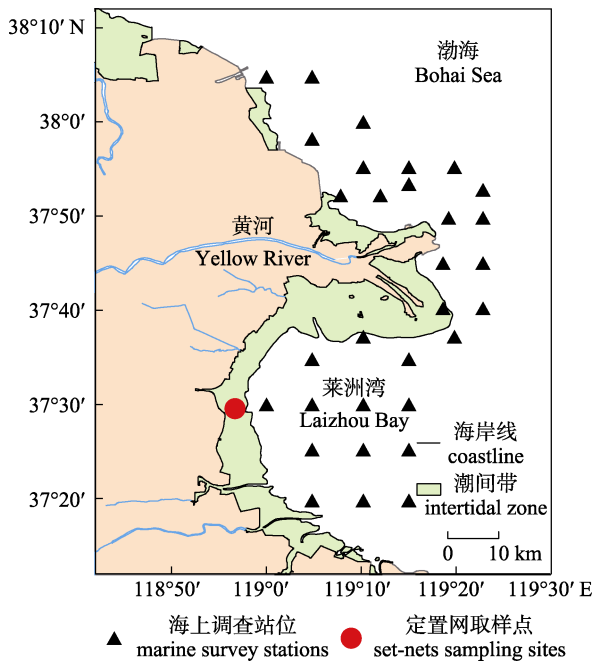


图 1 黄河口近岸海域调查站位及定置网取样点示意图
Fig. 1 Survey stations and set-nets sampling sites in the coastal waters of the Yellow River Estuary

定置网渔获数据来源于 2020 年 4—11 月的渔业生产调查。在每月的大潮日(农历初三或农历十

表 1 2020 年 4—7 月黄河口近岸海域产卵场调查时间及站位数

Tab. 1 Time of spawning ground survey and station numbers in the coastal waters of the Yellow River Estuary from April to July of 2020

月份 month	时间 time	站位个数 numbers of station
4 月 April	18 日—19 日, 26 日—29 日	31
5 月 May	5 月 24 日—6 月 1 日	31
6 月 June	6 月 27 日—7 月 5 日	31
7 月 July	24 日—31 日	31

八)前后采集 4 个网次,取样地点设在 118°57'59"E, 37°26'52"N 附近(图 1)。对渔获物进行种类鉴别,挑选鲎个体并进行生物学测定,分析其性腺发育程度,和鱼卵、仔稚鱼调查数据相结合,以判定鲎的产卵期。

1.1.2 环境数据 鲎鱼卵为浮性卵,仔稚鱼为漂浮生物,同时鲎为中上层鱼类,因此,鱼卵和仔稚鱼的分布主要受表层海洋环境的限制,表层水温、盐度、叶绿素浓度、离岸距离等因子均可能与鱼卵、仔稚鱼分布具有较强的相关性,为本研究需要考虑的因子。

与实测数据相比,遥感数据具有易于获取、大面和同步性等优势,随着遥感技术的发展,水色、水温遥感数据已被大量用于远洋和近海海洋渔业研究^[18-19]。考虑到研究区域为近岸海域,叶绿素浓度遥感反演精度低,因此只选择了遥感海表温度(remote sensing sea surface temperature, RSSST),其他环境数据采用 CTD 实测数据,以查验遥感水温在河口及近岸海域渔业生态研究的可行性。

(1) 遥感水温数据 该数据来自美国航空航天局(NASA)反演的全球卫星遥感三级数据产品,时间分辨率为 8 d(若调查时间多于 8 d,则取两个时间段的平均值),空间分辨率为 9 km (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>)。利用 R 程序读取研究区范围内的数据,以调查站位的经纬度为渔区中心点,计算对应渔区的平均值作为该渔区的水温值。

(2) 其他环境因子 水深、盐度为拖网调查过程中由 CTD 在每个站位同步测定,叶绿素浓度数据在实验室由萃取荧光法测得。

离岸距离指调查站位到岸上的最短距离,岸线由 Landsat 遥感数据获得,离岸距离由 ArcGIS 计算。

1.2 GAM 模型方法

广义可加模型(generalized additive model, GAM)是广义线性模型的扩展,可以直接处理响应变量与多个解释变量之间的非线性关系^[20-21],是处理物种分布与环境因子关系的常用模型,已广泛应用于渔业资源分布与环境因素关系研究^[22-23]。本研究采用 GAM 模型分析各时空和环境因子对黄河口近岸海域鲈鱼卵、仔稚鱼分布的影响。模型公式如下:

$$g(Y) = \alpha + \sum_{i=1}^k f_i(x_i) + \varepsilon$$

式中, Y 为鱼卵和仔稚鱼的总量; $g(Y)$ 为连接函数; x_i 为各环境因子; $f_i(x_i)$ 为 $g(Y)$ 与第 i 个环境因子的非参数函数,本研究中采用样条平滑函数; k 为环境因子个数; α 为截距项; ε 为误差项。

模型的构建分为两步:第一步,构建鲈鱼卵、仔稚鱼出现概率与环境因子的关系模型(PA, presence/absence),鱼卵、仔稚鱼出现站位记为 1,否则记为 0,数据服从二项分布(binomial distribution),采用 logit 链接函数;第二步,在鱼卵、仔稚鱼出现情况下,构建丰度与环境因子的关系模型[$\log_{10}(\text{Density})$],数据服从高斯分布(Gaussian distribution),采用 identity 链接函数。

1.3 模型选择

环境变量初步选择了遥感海表温度(RSSST)、表层盐度(SSS)、表层叶绿素浓度(Chla)、水深(Depth)、离岸距离(Distance)、经度(Longitude)和纬度(Latitude)共 7 个因子,在 VIF 多重共线性分析^[24]的基础上,将各因子逐步加入到 GAM 模型中。

综合考虑显著性检验、AIC 准则(Akaike Information)^[25-26]和偏差解释率对模型因子进行筛选。在因子具有显著性的基础上($P < 0.05$),AIC 值越小,偏差解释率越高,模型的拟合效果越好。不同模型间 AIC 小于 2 视为差异不显著^[22]。

鱼卵、仔稚鱼资源丰度时空分布图利用 ArcGIS10.2 完成,遥感水温数据读取、GAM 模型构建及检验分别通过 R4.1.0 软件 rhd5^[27]、mgcv^[28]包实现。

2 结果与分析

2.1 鲈产卵期

4 月,31 个取样站位中,20 个站位有鲈鱼卵、

仔稚鱼出现;其中共采集鲈鱼卵 5801 粒,分布在 12 个调查站位,仔稚鱼 3197 尾,分布在 17 个站位。5 月,共采集仔稚鱼 177 尾,于 12 个站位出现;6—7 月无鱼卵、仔稚鱼出现(表 2)。从鱼卵、仔稚鱼出现时间来看,4 月,由于海况原因,调查分为两个时段(表 1),4 月 18—19 日采集了 9 个站位样品,其中鱼卵出现站位有 2 个(每站各 10 粒),仔稚鱼出现站位 1 个(1 尾);4 月 26—29 日调查了 22 个站位,17 个站位有鱼卵、仔稚鱼出现,且数量较多。而 5 月底(5 月 24—6 月 1 日)的调查中,所获样品全部为仔稚鱼,数量较少。由数据分析结果可知,4—5 月为黄河口鲈的产卵盛期。

表 2 2020 年 4—7 月黄河口近岸海域鲈鱼卵、仔稚鱼采集数量及出现站位数

Tab. 2 The number of *Liza haematocheila* eggs, larvae and appearing stations in the coastal waters of the Yellow River Estuary from April to July of 2020

发育阶段 development stage	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July
鱼卵/粒 fish egg	5801 (12*)	0	0	0
仔稚鱼/尾 larvae	3197 (17*)	177 (12*)	0	0

注: *表示出现站位数量。

Note: * indicate the number of appearing stations.

4—11 月定置网共捕获鲈 981 尾,生物学分析结果显示,4 月(15—22 日取样),鲈性腺发育程度为 I~V 期,以 I 期和 III 期为主,分别为 54.62% 和 34.45%,还存在一定量的 IV 期和 V 期个体。5 月(30—31 日取样)出现 VI 期个体,所占比例为 11.53%,I 期个体比例增大至 84.61%,但无 III~V 期个体。自 6 月底开始,收集的样品中均未发现性成熟个体。这表明鲈生殖群体集中出现在 4—5 月,进一步证明了该时段是黄河口鲈的集中产卵期,定置网调查和产卵场调查结果相吻合。

2.2 鲈鱼卵、仔稚鱼分布

鲈鱼卵、仔稚鱼空间分布具有明显的区域性和月份变化。4 月,鲈鱼卵主要分布于黄河入海口以南莱州湾近岸水域,高资源密度站位较多,最高达 2000 粒/网以上;入海口以北仅有两个站位发现鱼卵分布,但资源密度较低(图 2a)。4 月,莱州湾和入海口附近水域均有仔稚鱼分布,其中资源密度较高的两个站位(1000~2000 尾/站)分布在

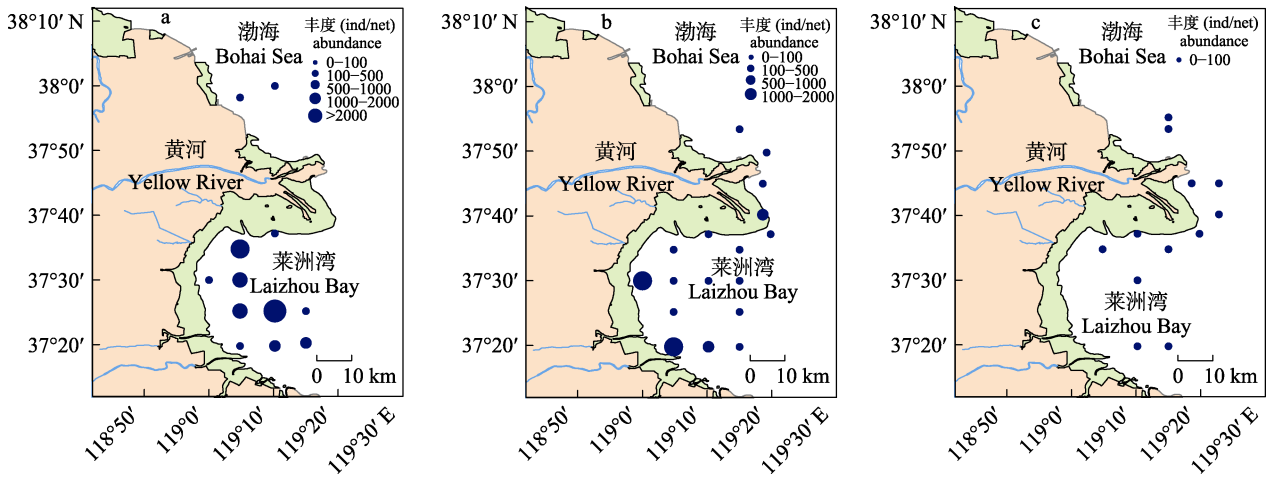


图 2 2020 年 4-5 月黄河口近岸海域鲈鱼卵、仔稚鱼分布
a. 4 月鲈鱼卵分布; b. 4 月鲈仔稚鱼分布; c. 5 月鲈仔稚鱼分布.

Fig. 2 Distribution of *Liza haematocheila* eggs and larvae in the coastal waters of the Yellow River Estuary in April and May of 2020

a. Fish eggs distribution in April; b. Larvae distribution in April; c. Larvae distribution in May.

离岸最近的水域(图 2b)。5 月, 鲈仔稚鱼分布范围较 4 月有所减小, 主要分布于入海口南北两侧及口门附近水域, 资源密度大大降低, 所有站位捕获的仔稚鱼密度均低于 100 尾; 莱州湾水域鲈仔稚鱼出现站位减少且近岸边无仔稚鱼分布(图 2c)。

2.3 GAM 模型

根据调查结果, 62 条数据用于 PA 模型构建, 32 条数据用于 $\log_{10}(\text{Density})$ 模型构建。将各解释变量逐一加入模型中, 根据变量的显著性、变量对偏差解释贡献率和 AIC 准则, 筛选模型因子, 最适模型分别如下:

$$PA \sim s(\text{Latitude}) + s(\text{RSSST}) + s(\text{Depth}) + s(\text{SSS}) + s(\text{Longitude})$$

$$\log_{10}(\text{Density}) \sim s(\text{Latitude}) + s(\text{RSSST})$$

由表 3 可知, 纬度(Latitude)、海表温度(RSSST)、水深(Depth)、海表盐度(SSS)和经度(Longitude)对鲈鱼卵、仔稚鱼的出现概率影响显著, 模型偏差解释率为 61.50%。其中纬度的影响最大, 偏差解释率为 27.45%; 海表温度次之, 偏差解释率为 13.83%; 水深、海表盐度和经度的偏差解释率分别为 3.23%、8.01%和 8.98%。在鲈资源丰度和环境因子模型中, 仅纬度和海表温度对鲈资源丰度影响显著, 两者的偏差解释率分别为 16.83%和 50.21%, 模型的总偏差解释率高达 67.04%。

2.4 鲈鱼卵、仔稚鱼分布与相关因子的关系

图 3 为各相关因子对鲈鱼卵、仔稚鱼出现概率的影响。空间效应方面, 鲈鱼卵、仔稚鱼主要分布在 37.4°N~37.9°N 之间, 随着纬度的升高, 鱼

表 3 模型拟合结果

Tab. 3 Results from different GAMs fitting

模型 model	加入的因子 factor added	累计解释偏差/% cumulative deviance explained	贡献率/% importance	AIC	显著性检验 P
PA	纬度 Latitude	27.45	27.45	83.17	0.0365
	遥感海表温度 RSSST	41.28	13.83	79.70	0.0356
	水深 Depth	44.51	3.23	77.65	0.0246
	海表盐度 SSS	52.52	8.01	72.59	0.0035
	经度 Longitude	61.50	8.98	63.30	0.0003
Number	纬度 Latitude	16.83	16.83	142.95	0.0308
	遥感海表温度 RSSST	67.04	50.21	124.92	0.0010

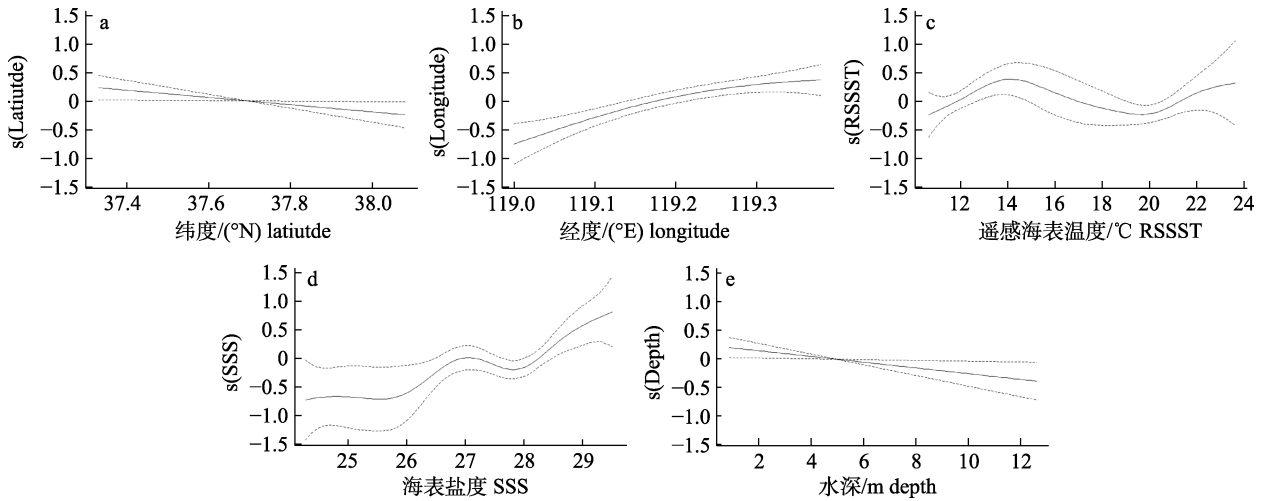


图 3 时空和环境因子对鲈鱼卵、仔稚鱼出现概率的影响

Fig. 3 Effects of spatio-temporal and environmental factors on the occurrence probability of *Liza haematocheila* eggs and larvae

卵、仔稚鱼出现概率下降(图 3a); 119.1°E~119.3°E 范围内, 鲈鱼卵、仔稚鱼出现概率与经度呈正相关, 随着经度升高, 出现概率增加(图 3b)。

环境效应方面, 鲈鱼卵、仔稚鱼主要出现在 11~14 °C 和 19~22 °C 范围内, 在 11~14 °C 之间, 鲈鱼卵、仔稚鱼的出现概率与表层水温呈正相关, 随着温度的升高出现概率增大; 在 19~22 °C 之间, 随着水温升高, 出现概率先降低后增大(图 3c)。表层盐度对鲈鱼卵、仔稚鱼分布影响较大, 分布范围集中在 26.5~29 之间, 出现概率随着表层盐度的变化而波动(图 3d)。鲈鱼卵、仔稚鱼主要于

2~6 m 水深范围内集中出现, 随着水深增加, 出现概率大幅下降(图 3e)。

在加入模型的 7 个因子中, 仅纬度和水温对鲈鱼卵、仔稚鱼丰度有重要影响。鲈鱼卵、仔稚鱼丰度与纬度呈负相关, 随着纬度升高, 丰度急剧下降, 37.5°N~37.7°N 为鲈鱼卵、仔稚鱼丰度的集中分布区(图 4a)。水温对鲈鱼卵、仔稚鱼的影响相对复杂, 11~14 °C 和 19~22 °C 为丰度集中分布区, 两个温度范围内, 鱼卵、仔稚鱼丰度变化趋势相同, 随着水温升高, 均呈急剧下降后迅速上升态势(图 4b)。

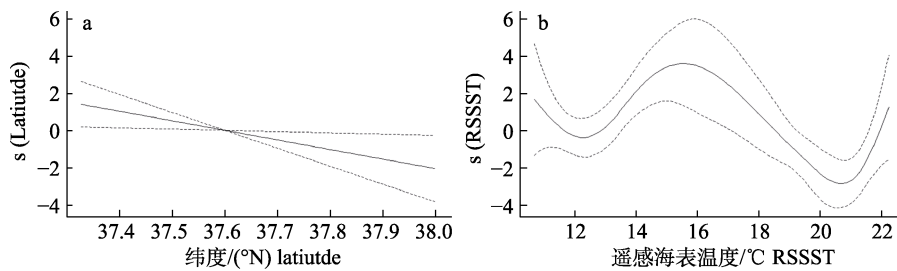


图 4 纬度(a)和水温(b)对鲈鱼卵、仔稚鱼密度的影响

Fig. 4 Effects of latitude (a) and remote sensing sea surface temperature (b) on the density of fish eggs and larvae

3 讨论

3.1 黄河口近岸海域鲈产卵期及其鱼卵、仔稚鱼的时空分布

作为被捕食者的鱼卵和作为被捕食者和捕食者的仔稚鱼在海洋生态系统食物链中起着重要作

用。明确鲈的产卵期, 深入理解鲈鱼卵、仔稚鱼的时空分布和早期补充机制是科学制定渔业资源养护策略和维持该资源可持续发展的基础。鲈在深浅水之间做定向季节巡游, 每年 12 月随着水温的下降, 鲈离开近岸浅水区, 游到深水区越冬, 翌年 3 月中下旬, 随着水温的上升向近岸浅水区

索饵育肥,并于4—5月在河口区产卵^[29]。王爱勇^[30]对2008年莱州湾鱼卵、仔稚鱼的研究表明,5月底的调查取样中,鲈鱼卵、仔稚鱼均出现,出现频率大于50%;6月中旬所获样品中,仅仔稚鱼出现,但出现频率降为26.32%。杨艳艳等^[8]分析了莱州湾鱼卵、仔稚鱼的群落结构,5月采获的仔稚鱼中,鲈仔稚鱼的数量最多,占有仔稚鱼数量的一半以上。本研究根据黄河口近岸海域产卵场调查,发现4月水平网样品中有鱼卵和仔稚鱼分布,4月中旬鱼卵、仔稚鱼的出现概率为33.33%,且样品中鱼卵、仔稚鱼数量均较少,仅1尾仔稚鱼出现;4月底鱼卵、仔稚鱼的出现概率为77.27%,样品中有大量的鱼卵和仔稚鱼。5月底仅有仔稚鱼分布,且数量较少。定置网渔获数据生物学分析表明鲈在4月中下旬出现较多IV期和V期个体,5月底出现VI期个体,但无III~V个体,表明5月底鲈生殖群体已基本完成产卵。产卵场调查与定置网调查结果均表明4—5月是该区域鲈的繁殖盛期,该研究结果与上述已发表结论基本一致。但受海水温度等环境因子的影响,具体产卵时间会略有变动。

鲈鱼卵、仔稚鱼的空间分布(图2)表明,鲈鱼卵主要分布于黄河入海口以南的莱州湾水域,入海口以北水域零星分布,黄河入海口门水域无鱼卵分布。而仔稚鱼在莱州湾水域和入海口门处均有分布。莱州湾位于黄河入海口南部,属于半封闭海湾,沿岸有黄河、小清河、小岛河等10余条河流入海,尤其是黄河冲淡水使黄河附近海域形成营养盐丰富、水温适宜、低盐度等水环境特征,使得莱州湾海域为黄、渤海多种渔业资源种类重要的产卵场、索饵场和育幼场^[31-32]。鱼卵不具备活动能力^[33],其分布主要受亲鱼分布、海流和潮汐影响^[34]。莱州湾内水文状况相对稳定,又是重要产卵场,因此,鲈鱼卵主要分布于莱州湾内。而仔稚鱼具有一定的巡游性游泳能力^[33],对低盐度的水流具有强烈的趋流性^[34],其分布除与海流、潮汐的关系密切外,还具备了主动追索食饵的习性^[35-36],在饵料生物丰富的区域内仔稚鱼的巡游速度减慢并滞留在生物分布区。黄河入海带来了丰富的营养,蕴育了大量的生物有机体,为鱼类幼体的生长育肥提供了丰足的食物。另一方面,

春季黄河入海径流量较少,河口段水位变幅小,处于相对稳定期;河口区水文要素垂向混合强烈,温、盐、密度分布均匀^[37];加之较弱的潮汐运动,在黄河口处形成了有利于仔稚鱼发育的稳定水文条件。此外,受黄河入海口岸线外伸的影响,在现行流路和以南的废弃流路之间出现一岬角涡旋,湾内侧的顺时针流涡较强,流速在50 cm/s以上^[38],仔稚鱼被入海口南部的岬角涡旋捕陷于涡旋内。因此,除莱州湾内,仔稚鱼在入海口门处也有分布。

GAM结果表明,空间因子影响鲈鱼卵、仔稚鱼的分布,经度仅对鲈鱼卵、仔稚鱼的出现概率有较大影响,对丰度影响不显著,而纬度对出现概率和丰度均影响显著。研究区范围内,随着纬度升高,鲈鱼卵、仔稚鱼出现概率和丰度均降低(图3a, 4a)。由鲈鱼卵、仔稚鱼的平面分布(图2)可以看出,黄河口北部海域鲈鱼卵、仔稚鱼少有分布。根据秦雪等^[9]对2014年5月黄河口水域鱼卵、仔稚鱼种类组成和数量分布的研究可知,5月鱼卵密集区分布在黄河口北部近岸海域,以日本鳀和赤鼻棱鳀为主;仔稚鱼主要集中于黄河口南部海域,以赤鼻棱鳀和矛尾虾虎鱼为主;黄河口北部近岸海域的鱼卵密集区,同时有少量斑鲈、鲈等,分布区域和本研究结果(图2a)一致。关于鲈鱼卵、仔稚鱼不在黄河口北部海域集中分布的原因需要后续研究进一步深入探讨。

3.2 鲈鱼卵、仔稚鱼分布与环境因子的关系

海洋环境是海洋生物赖以生存的基础,海洋生物的活动分布、繁殖和生长都与海洋环境密不可分^[39]。本研究结果显示,水温、盐度和水深影响鲈鱼卵、仔稚鱼的出现概率和丰度。

鱼类一般喜在适宜温度水域内生活,而对超出适宜温度的高温或低温均具回避行为。本研究结果显示,水温对鲈鱼卵、仔稚鱼的分布和丰度都影响显著,对出现概率模型的贡献率为13.83%,对丰度模型的贡献率达到50.21%。鱼卵、仔稚鱼出现概率和丰度均在11~14℃和19~22℃之间较为集中(图3c, 图4b)。由图5可以看出,4月水温偏低,鱼卵、仔稚鱼主要集中在11~14℃之间;而5月水温上升,鱼卵、仔稚鱼主要集中在19~22℃之间。但水温对两者的影响方式不同,11~14℃范

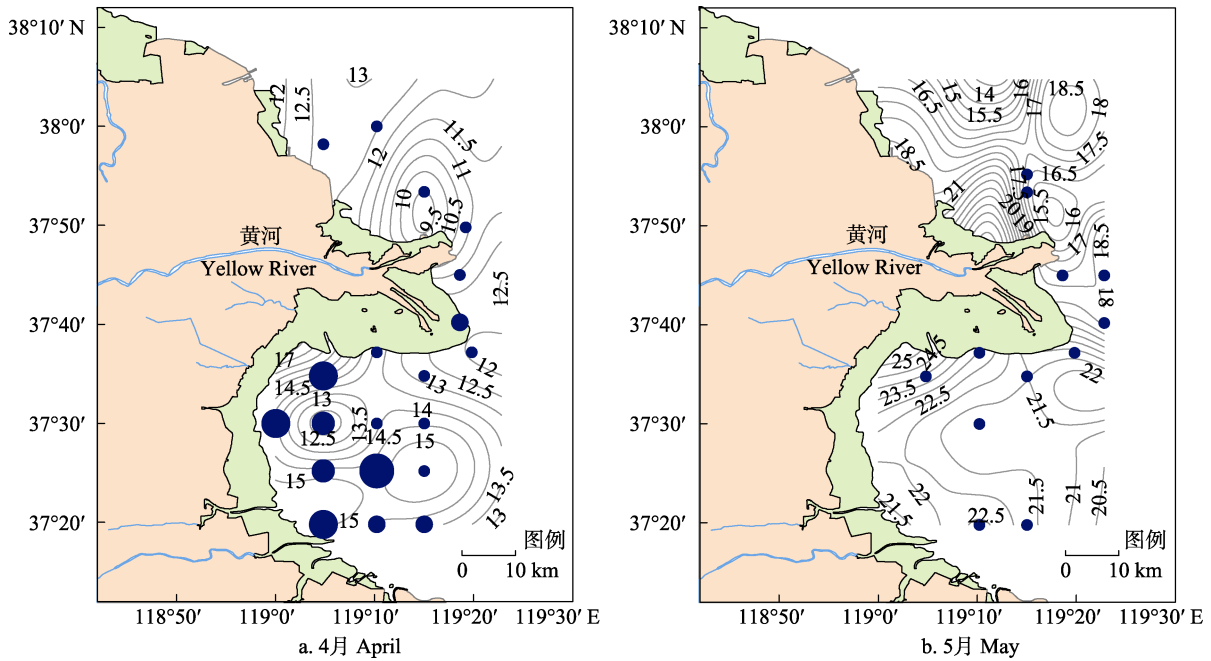


图 5 鲎鱼卵仔稚鱼和水温分布
鱼卵和仔稚鱼合并计数。

Fig. 5 Distribution of *Liza haematocheila* eggs, larvae and water temperature
Counting of fish eggs and larvae was combined.

围内, 鱼卵、仔稚鱼出现概率随着水温的升高而增加, 丰度则随着水温的升高先减少后增加。19~22 °C 范围内, 出现概率和丰度均呈先降低后增加的趋势, 丰度的变化较出现概率更为剧烈。这是因为水温是影响鱼类生态习性的主要环境因子之一^[40], 对鱼类的存活、新陈代谢、繁殖行为及种群的结构和洄游分布都有不同程度的影响。此外, 水温的变动直接影响到作为鱼类早期发育过程中必不可少的饵料生物的盛衰, 从而影响到仔鱼的资源补充量和存活率^[41]。鲎的求食适宜温度在 10~26 °C 之间^[42], 产卵场适宜水温在 15~22 °C^[43], 本研究获得的结果与该范围基本一致。

盐度在鱼类的生活史中发挥着重要的作用, 鱼类在不同发育阶段(如受精、孵化、产卵等)的发育起点和发育速度都与盐度的高低密切相关^[22,44-45]。盐度对鲎鱼卵、仔稚鱼的出现概率影响显著, 对模型贡献率为 8.01%, 而对丰度无显著影响。在 24~30 盐度范围均有鲎鱼卵、仔稚鱼出现, 以 26.5~29 分布最为集中, 该范围内鲎鱼卵、仔稚鱼的出现概率呈波动上升趋势(图 3d)。葛国昌等^[46]

分析了盐度对鲎鱼卵和初孵仔鱼的作用, 结果表明盐度影响鱼卵的浮沉和仔鱼孵出率, 鲎在盐度 5~40.2 的范围内都能孵化, 但能孵出正常仔鱼的较适宜盐度范围为 15~35.6。鲎的孵化在低盐度范围内比较适宜, 这是因为低盐水使生活在该水域的广盐性鱼类用于渗透调节的能量降低, 这对鱼类幼体存活具有重要意义^[47]。

鲎鱼卵、仔稚鱼出现概率与水深显著相关, 1~10 m 水深内均有鱼卵、仔稚鱼分布, 随着水深增加, 出现概率缓慢降低(图 3e)。有研究表明, 鲎喜分散栖息在近岸浅水, 一般在距离岸边 2~8 km 的海区或河口港湾产卵^[48]; 沿岸碎波带是鲎仔稚鱼的良好保育场, 仔稚鱼有随着潮水向岸巡游的趋势^[12]。春季是气温上升期, 近岸水域在陆地暖空气和水深的影响下^[49-50], 水温呈现近岸高远岸低的特点, 这可能会导致生殖群体向近岸聚集产卵; 同时, 莱州湾有多条河流注入, 河流入海带来了丰富的营养盐并形成低盐水系, 这也是产卵繁殖的有利条件。研究区等深线分布均匀, 水深自近岸向外海递加, 因此, 随着水深增加, 鲎鱼

卵、仔稚鱼出现概率缓慢递减。宋秀凯等^[7]的研究也表明, 鱼卵、仔稚鱼在黄河、广利河和老弥河口附近海域数量较多, 莱州湾中部海域数量较少。

4 结论

本研究在利用调查数据分析鲈产卵期和鱼卵、仔稚鱼空间分布的基础上, 基于 GAM 模型, 结合遥感海表温度, 通过两步建模法分别研究了环境因子对鱼卵、仔稚鱼出现概率和丰度的影响。4—5 月是黄海口近岸海域鲈的繁殖盛期, 鱼卵主要分布在莱州湾内, 仔稚鱼分布在湾内和黄河入海口门水域。水温对鲈鱼卵、仔稚鱼的分布和丰度均有重要影响, 集中分布在 11~14 °C 和 19~22 °C 范围内, 但在 11~14 °C 之间水温对鱼卵、仔稚鱼的分布和丰度影响方式不同; 盐度与鱼卵、仔稚鱼分布关系密切, 对丰度影响不显著; 水深显著影响鱼卵、仔稚鱼的分布, 随着水深增加, 出现概率降低。本研究同时表明, 遥感水温用于近岸海域渔业生态研究是完全可行的, 可以很好地解释鱼类分布的环境特征。

参考文献:

- [1] Wan R J, Jiang Y W. The species and biological characteristics of the eggs and larvae of osteichthyes in The Bohai Sea and Yellow Sea[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2000, 9(4): 290-297. [万瑞景, 姜言伟. 渤、黄海硬骨鱼类鱼卵与仔稚鱼种类组成及其生物学特征[J]. 上海水产大学学报, 2000, 9(4): 290-297.]
- [2] Jiang M, Wang Y L, Lin Q, et al. Distribution characteristics of fish eggs and larvae around Yangshan Port in Hangzhou Bay[J]. Marine Environmental Science, 2008, 27(1): 43-46. [蒋玫, 王云龙, 林钦, 等. 洋山深水港水域鱼卵仔鱼分布特征[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(1): 43-46.]
- [3] Ellis T, Nash R D M. Predation by sprat and herring on pelagic fish eggs in a plaice spawning area in the Irish Sea[J]. Journal of Fish Biology, 1997, 50(6): 1195-1202.
- [4] 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.]
- [5] Perry A L, Low P J, Ellis J R, et al. Climate change and distribution shifts in marine fishes[J]. Science, 2005, 308(5730): 1912-1915.
- [6] Bian X D, Zhang X M, Gao T X, et al. Category composition and distributional patterns of ichthyoplankton in the Yellow River Estuary during spring and summer 2007[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(4): 815-827. [卞晓东, 张秀梅, 高天翔, 等. 2007 年春、夏季黄河流域鱼卵、仔稚鱼种类组成与数量分布[J]. 中国水产科学, 2010, 17(4): 815-827.]
- [7] Song X K, Liu A Y, Yang Y Y, et al. Distributing of ichthyoplankton and the correlation with environmental factors in Laizhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(3): 378-385. [宋秀凯, 刘爱英, 杨艳艳, 等. 莱州湾鱼卵、仔稚鱼数量分布及其与环境因子相关关系研究[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(3): 378-385.]
- [8] Yang Y Y, Zhu M M, Xu B Q, et al. Seasonal variation of community structure and diversity of ichthyoplankton in the Laizhou Bay[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(9): 59-70. [杨艳艳, 朱明明, 徐炳庆, 等. 莱州湾鱼卵、仔稚鱼群落结构及多样性的季节变化[J]. 海洋学报, 2021, 43(9): 59-70.]
- [9] Qin X, Zhang C L, Xiao H H, et al. Composition and distribution of fish eggs and larvae in Yellow River Estuary[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(7): 46-55. [秦雪, 张崇良, 肖欢欢, 等. 黄河口水域春、夏季鱼卵、仔稚鱼种类组成和数量分布[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(7): 46-55.]
- [10] Cheng Q T, Zheng B S. Systematic Synopsis of Chinese Fishes (Volume I) [M]. Beijing: Science Press, 1987: 269-271. [成庆泰, 郑葆珊. 中国鱼类系统检索(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 269-271.]
- [11] Cheng Q T, Zhou C W. Fishes of the Shandong[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1997: 243-244. [成庆泰, 周才武. 山东鱼类志[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1997: 243-244.]
- [12] Zhong J S, Fu C Z, Yu W W, et al. Occurrence and stay period of the juvenile *Liza haematocheila* in the surf zone of Yangtze Estuary[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2006, 15(3): 281-285. [钟俊生, 傅萃长, 郁蔚文, 等. 鲈鱼稚鱼在沿岸碎波带的出现和滞留时间[J]. 上海水产大学学报, 2006, 15(3): 281-285.]
- [13] Li M D, Wang Z W. The age and growth of mullet in Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1982, 4(4): 508-515. [李明德, 王祖望. 渤海梭鱼的年龄与生长[J]. 海洋学报(中文版), 1982, 4(4): 508-515.]
- [14] Ji Y, Zhao F, Yang Q, et al. Sagittal otolith morphology and the relationship between its mass and the age of *Liza haema-*

- tocheila* in the Yangtze Estuary, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(3): 953-960. [纪严, 赵峰, 杨琴, 等. 长江口鲈矢耳石形态特征及质量与年龄的关系[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 953-960.]
- [15] Zhu C D. Aspects on the first-feeding stage and foods of fish larvae[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1986, 10(1): 86-95. [朱成德. 仔鱼的开口摄食期及其饵料综述[J]. 水生生物学报, 1986, 10(1): 86-95.]
- [16] Yuan X N. Studies on the relationship between the gape size of *Liza haematocheilus* larvae and the planktonic copepods[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. [袁小楠. 渤海湾和莱州湾鲈鱼仔稚鱼口裂与浮游桡足类的关系研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.]
- [17] Ge G C, Song W H. Effect of salinity on eggs and newly-hatched larvae of mugil so-iuy basilewsky[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1985, 15(1): 93-98. [葛国昌, 宋卫红. 盐度对梭鱼卵和初孵仔鱼的作用[J]. 山东海洋学院学报, 1985, 15(1): 93-98.]
- [18] Ding Q, Chen X J, Wang J T. Comparison habitat suitability index model of *Illex argentinus* and its application into fishing ground forecasting[J]. Progress in Fishery Sciences, 2015, 36(3): 8-13. [丁琪, 陈新军, 汪金涛. 阿根廷滑柔鱼 (*Illex argentinus*) 适宜栖息地模型比较及其在渔场预报中的应用[J]. 渔业科学进展, 2015, 36(3): 8-13.]
- [19] Niu M X, Wang J. Variation in the distribution of wintering anchovy *Engraulis japonicus* and its relationship with water temperature in the central and southern Yellow Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2017, 35(5): 1134-1143.
- [20] Hastie T, Tibshirani R. Generalized Additive Models[M]. London: Chapman and Hall, 1990: 352.
- [21] Venables W N, Ripley B D. GLMs, GAMs and GLMMs: An overview of theory for applications in fisheries research[J]. Fisheries Research, 2004, 70(2-3): 319-337.
- [22] 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.]
- [23] Li M, Xu B D, Ma Q Y, et al. Generalized additive model reveals effects of spatiotemporal and environmental factors on the relative abundance distribution of *Konosirus punctatus* in the Yellow River Estuary and its adjacent waters[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(5): 963-969. [李敏, 徐宾铎, 麻秋云, 等. 时空及环境因子对黄河口及邻近水域斑斑资源丰度的影响[J]. 中国水产科学, 2017, 24(5): 963-969.]
- [24] Kabacoff R I. R in Action: Data Analysis and Graphics with R[M]. Greenwich: Manning Publications, 2011: 1-474.
- [25] Burnham K P, Anderson D R. Model Selection and Inference: A Practical Information-Theoretic Approach[M]. New York: Springer, 1998.
- [26] Damalas D, Megalofonou P, Apostolopoulou M. Environmental, spatial, temporal and operational effects on swordfish (*Xiphias gladius*) catch rates of eastern Mediterranean Sea longline fisheries[J]. Fisheries Research, 2007, 84(2): 233-246.
- [27] Fischer B, Smith M, Pau G. rhdf5: R Interface to HDF5. R package version 2.36.0. 2021. <https://github.com/grimbough/rhdf5>
- [28] Hastie T. gam: Generalized Additive Models[CP/OL]. <https://cran.r-project.org/package=gam>
- [29] Li M D, Wang Z W. The age and growth of mullet in Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1982, 4(4): 508-515. [李明德, 王祖望. 渤海梭鱼的年龄与生长[J]. 海洋学报(中文版), 1982, 4(4): 508-515.]
- [30] Wang A Y. Preliminary study of the ichthyoplankton assemblage structure in Laizhou Bay in spring and its 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.]
- [31] Jin X S, Deng J Y. Yearly variations of fishery resources and biodiversity in the Laizhou Bay[J]. Marine Fisheries Research, 1999, 20(1): 6-12. [金显仕, 邓景耀. 莱州湾春季渔业资源及生物多样性的年间变化[J]. 海洋水产研究, 1999, 20(1): 6-12.]
- [32] Zhang H L, Yang J Q, Cui W L. Status of salinity changes and the effect on marine environments and ecosystem in Laizhou Bay[J]. Marine Environmental Science, 2006, 25(S1): 11-14. [张洪亮, 杨建强, 崔文林. 莱州湾盐度变化现状及其对海洋环境与生态的影响[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(S1): 11-14.]
- [33] Yin M C, Blaxter J H S. Cruising 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.]
- [34] Li M D, Wang X L, Lv X Y, et al. Mullet [M]. Beijing: Ocean Press, 1997: 1-97. [李明德, 王秀玲, 吕宪禹, 等. 梭鱼. 北京: 海洋出版社, 1997: 1-97.]
- [35] Griocche 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.
- [36] Grønkjær P, Clemmesen C, St John M. Nutritional condition and vertical distribution of Baltic cod larvae[J]. Journal of Fish Biology, 2006, 51: 352-369.
- [37] Li Z G. Basic features of hydrologic elements in the sea area near the Yellow River Estuary[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 2000, 18(3): 20-28. [李泽刚. 黄河河口附近海区水文要素基本特征[J]. 黄渤海海洋, 2000, 18(3): 20-28.]
- [38] Fan H, Huang H J. Changes in Huanghe (Yellow) River Estuary since artificial re-routing in 1996[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2005, 23(3): 299-305.
- [39] Sherman K, Lasker R, Richards W et al. Ichthyoplankton and fish recruitment studies in large marine ecosystems[J]. Marine Fisheries Review, 1983, 45(10-12): 1-25.
- [40] Li X D. Studies on the correlation between the temperature of sea water and fishing grounds[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1982, 4(1): 103-113. [李雪渡. 海水温度与渔场之间的关系[J]. 海洋学报(中文版), 1982, 4(1): 103-113.]
- [41] Yin M C. Fish Ecology[M]. Beijing: Agriculture Press, 1995: 150-151. [殷名称. 鱼类生态学[M]. 北京: 农业出版社, 1995: 150-151.]
- [42] Shanghai Fisheries College. Ichthyology and Mariculture[M]. Beijing: Agriculture Press, 1982: 393-404. [上海水产学院. 鱼类学与海水鱼类养殖[M]. 北京: 农业出版社, 1982: 393-404.]
- [43] Wang J. Evaluation and Management of Fishery Resources in the Middle and Lower Reaches of the Yellow River Mainstream and Its Estuary[M]. Beijing: Science Press, 2021: 145-146. [王俊. 黄河干流中下游及河口海域渔业资源评价与管理[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 145-146.]
- [44] 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.]
- [45] Wang Y F, Zhu X H. A review on impact of salinity on patterns of fish ecophysiology[J]. Studia Marina Sinica, 2002: 151-158. [王云峰, 朱鑫华. 盐度对鱼类生态生理学特征的影响[J]. 海洋科学集刊, 2002: 151-158.]
- [46] Ge G C, Song W H. Effect of salinity on eggs and newly-hatched larvae of mugil so-iuy basilewsky[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1985, 15(1): 93-98. [葛国昌, 宋卫红. 盐度对梭鱼卵和初孵仔鱼的作用[J]. 山东海洋学院学报, 1985, 15(1): 93-98.]
- [47] Potter I C, Beckley L E, Whitfield A K, et al. Comparisons between the roles played by estuaries in the life cycles of fishes in temperate Western Australia and Southern Africa[J]. Environmental Biology of Fishes, 1990, 28(1-4): 143-178.
- [48] Jiang R J, Tang J H, Liu P T, et al. Horizontal distribution and moving tendency of *Liza haematocheila* larvae and juveniles in the coastal surface of the South Yellow Sea[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2007, 16(4): 323-328. [蒋日进, 汤建华, 刘培廷, 等. 黄海南部沿岸鲈鱼仔稚鱼的表层分布及移动趋势[J]. 上海水产大学学报, 2007, 16(4): 323-328.]
- [49] Zhao B R, Zhuang G W, Cao D M, et al. Circulation, tidal residual currents and their effects on the sedimentations in the Bohai Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1995, 26(5): 466-473. [赵保仁, 庄国文, 曹德明, 等. 渤海的环流、潮余流及其对沉积物分布的影响[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(5): 466-473.]
- [50] Zhao J, Zhang X M, Bian X D, et al. Species composition and distribution of ichthyoplankton in the coastal waters of Huludao in 2009[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(11): 34-42. [赵静, 张秀梅, 卞晓东, 等. 2009 年葫芦岛附近海域鱼卵仔稚鱼种类组成与数量分布[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, 41(11): 34-42.]

Egg and larval distribution of *Liza haematocheila* and their relationship with environmental factors in the coastal waters of the Yellow River Estuary

NIU Mingxiang^{1,2}, ZUO Tao^{1,2}, WANG Jun^{1,2}, CHEN Ruisheng¹, ZHANG Jiayu³

1. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Ecological Environment (SFREE), Qingdao 266071, China;
2. Marine Ecology and Environmental Science Laboratory, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China;
3. Dongying Port Economic Develop Area Substation, Dongying Natural Resources and Planning Bureau, Dongying 257020, China

Abstract: *Liza haematocheila* is an important economic fish in the Yellow River estuary waters. The species lays eggs which hatch as larvae in the shallow waters, or the interchange areas of salt and fresh water in the estuary every spring, and move to coastal waters to grow within changing tides. The fish migrate into the deep-water area of the Bohai sea for winter. Fish eggs and larvae are the basis of supplement and sustainable utilization of marine fish resources, and changes in their quantitative distribution are very significant to maintain the balance of marine ecosystems. At present, the researches on *Liza haematocheila* mainly involve such parameters as age, growth, feeding, breeding habits, etc. However, there is no report on the distribution of *Liza haematocheila* eggs and larvae in the coastal zone of the Yellow River estuary. In order to understand the distribution of *Liza haematocheila* eggs and larvae, and to investigate thoroughly the impacts of environmental factors on such distribution in the coastal waters of the Yellow River estuary, this study analyzed the spawning period, spatial distribution of fish eggs and larvae of *Liza haematocheila* and their relationship with environmental factors. Data were collected from a spawning grounds survey conducted during April and July of 2020 and from a set net survey during April and November of 2020. Due to no eggs and larvae being caught during some sampling events, a two-step GAM was constructed which modeled presence/absence data (PA model) and density of presence observation (density model). The results indicated that the peak spawning period of *Liza haematocheila* was from April to May in the coastal waters of the Yellow River estuary. The spatial distribution characteristic of fish eggs was different from larvae, with fish eggs being concentrated in the coastal waters of Laizhou Bay, and larvae distributed in Laizhou Bay and the estuary of the Yellow River. Water temperature was significantly associated with both presence and density of fish eggs and larvae. For the PA model, SST (sea surface temperature) was the second most important factor and determined more than 13% of the deviance, while the final model determined 61.50% of the variance in fish eggs and larvae presence/absence. For the density model, SST determined the largest portion of the data deviance (> 50.21%) and the final model determined 67.04% of the variance in density, given presence. Both occurrence and density of fish eggs and larvae were mainly in the range of 11–14 °C and 19–22 °C. However, variation of temperature affected them in different ways. As water temperature increased from 11 °C to 14 °C, the occurrence probability increased, but the density at first decreased and then increased. During temperature increase from 19 °C to 22 °C, both showed a trend decreasing first and then increasing, but the change of density was much greater than the occurrence probability. Salinity had a significant effect on the occurrence of fish eggs and larvae, with explaining 8.01% of the deviance of the PA model; however, it had no obvious effect on density. Fish eggs and larvae of *Liza haematocheila* occurred in the salinity range of 24–30, with the most concentrated distribution and a fluctuating upward trend occurring between 26.5 and 29. Depth was significantly associated only with the occurrence of fish eggs and larvae, which were distributed between 1 m and 10 m. The occurrence probability decreased slowly with the increase of water depth and was most concentrated at 2–6 m. This supports the view that *Liza haematocheila* lay eggs in shallow water near the shore. The results of the study provided a scientific basis for the protection of spawning grounds and resource conservation. It also proved that the application of remote sensing of water temperature was feasible for fishery ecological research in estuarine and nearshore waters.

Key words: the Yellow River Estuary; *Liza haematocheila*; fish egg; larvae; spatio-temporal distribution; environmental factor; GAM; remote sensing

Corresponding author: WANG Jun. E-mail: wangjun@ysfri.ac.cn