

文章编号: 1674-5566(2024)01-0172-14

DOI: 10.12024/jsou.20230304106

黄海中部夏季鳀鱼卵、仔稚鱼分布与早期生长特征

柳 昊, 张文超, 李文甲, 刘殊豪, 田 浩, 王艺翰, 叶振江, 田永军

(中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003)

摘要: 鳀(*Engraulis japonicus*)是黄海海域重要的捕捞对象,也是蓝点马鲛(*Scomberomorus niphonius*)等大型鱼类的主要饵料。探究鳀早期生活史阶段的分布及生长特征,是深入了解鳀补充机制的重要基础。基于2019年夏季黄海中部断面(119.7°E~123.5°E, 35.5°N~36.5°N)调查数据,探究了鳀鱼卵、仔稚鱼的分布特征;分析比较了5种分布模型,选取Tweedie GAM模型研究了鳀鱼卵、仔稚鱼分布与环境因子的关系;基于鳀仔稚鱼耳石微结构分析,估算了鳀仔稚鱼的日龄和体长组成,逆推孵化日期,构建幂函数早期生长方程。结果显示,2019年夏季在山东半岛南部35.5°N断面海域形成鳀鱼卵的密集分布区,仔稚鱼密集分布区为123.5°E、35.5°~36.5°N纵向断面海域。盐度对鱼卵、仔稚鱼的分布都有显著影响,最适盐度为30~32;温度仅对鱼卵的分布有显著影响,最适温度为23~26℃。本研究共鉴定和分析211尾鳀仔稚鱼的日龄,体长为4~24 mm,优势体长组为12~14 mm,日龄为12~40 d,优势日龄组为18~20 d;耳石增长率为3.08~5.90 μm/d,其变化趋势在2个航次间差异显著,这可能与月份间的温度差异有关。本研究为鳀资源的早期生长和补充机制提供了科学依据。

关键词: 鳀; 鱼卵; 仔稚鱼; 分布; 早期生长

中图分类号: S 931

文献标志码: A

鳀(*Engraulis japonicus*)隶属于鲱形目(Clupeiformes)鳀科(Engraulidae)鳀属(*Engraulis*),俗称“离水烂”、“鲛鱼食”、“海蜒”等,广泛分布于西北太平洋,是我国近海的关键种^[1],也是黄海鱼类资源蕴藏最丰富的鱼种,支撑着中国百万吨的渔业产量。在过度捕捞和全球变暖的背景下,鳀近年来的产量仍保持在较高水平,但其资源量呈现较大的年际、年代际波动特征且存在群体组成低龄化、小型化、群体密度小、渔场不稳定等现象^[2]。除捕捞压力外,海洋环境变化对鳀的影响显著^[3-4]。海洋环境微小的变化都能引起鳀生长、存活等早期生活史特征的巨大变化,从而影响其补充状态并在很大程度上决定其世代的强弱^[5],进而在短期内引起资源量的剧烈波动,所以海洋环境变化是鳀资源数量变动的关键^[4,6]。因此,对鳀早期生活史阶段的研究尤为重要。日本学者针对日本沿海产卵场鳀的早期生活史进行了很多研究,例如鱼卵和仔稚鱼的时空分布、摄食与生长等方面^[7-12],国内学者

对鳀的研究主要涉及生物学、资源评估、鱼卵和仔稚幼鱼的数量、分布和季节变化等方面^[13-22]。

黄海近岸是鳀传统的产卵场之一^[23-26],春季时鳀成鱼从越冬场洄游到近岸进行产卵,产卵期可从4月下旬持续至9—10月,主要产卵期为夏季5—7月^[16,24,27]。夏季黄海最显著的水文特征即黄海冷水团(Yellow sea cold water mass, YSCWM),丰富的饵料生物、营养盐等为鳀的生长、繁殖和栖息提供了良好的条件,是鳀资源量的重要补充来源。但在人类活动和全球变暖的背景下,黄海水温显著升高,1976—2000年黄海水温平均升高了1.7℃^[28],并且,黄海海域也存在明显的气候跃变,冷期与暖期的夏季平均表层水温相差达到0.57℃^[29-30]。因此,及时了解夏季黄海海洋环境波动对鳀鱼卵、仔稚鱼的分布及其早期生长的影响,是认知鳀的早期补充机制和资源变动趋势的重要基础。

基于2019年7月和8月两个航次的黄海中部

收稿日期: 2023-03-01

修回日期: 2023-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(41930534)

作者简介: 柳 昊(1998—),男,硕士研究生,研究方向为鳀鱼早期生活史。E-mail:lh18364897312@163.com

通信作者: 田永军, E-mail:yjtian@ouc.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

近岸断面调查数据,探究鲷早期生活史阶段鱼卵和仔稚鱼的分布特征及其与环境因子的关系,同时结合鲷仔稚鱼耳石微结构,分析鲷仔稚鱼的日龄和体长组成,并逆推其孵化日期,构建早期生长方程,阐明鲷早期生长速率的差异,为其早期补充过程和资源保护及生态、生物学的研究提供基础资料。

1 材料与方 法

1.1 调查采样

鲷鱼卵、仔稚鱼样品以及环境数据来源于2019年在黄海中部海域进行的断面调查。调查海域为119.7°E~123.5°E和35.5°N~36.5°N,共计两个航次,时间分别为7月9—16日、8月14—21日。两个航次站位如图1所示,站位数量见表1。每站使用大型浮游生物网(网口直径0.8 m,网目0.505 mm,网衣2.8 m)和专项仔稚鱼网(网口直径1.3 m,网目0.505 mm,网衣6 m)分别对鲷鱼卵和仔稚鱼进行水平拖网采样。采集的样品保存带回实验室,依据《海洋调查规范第6部分:海洋生物调查》(GB12763.6—2007)^[31],在光学显微镜和解剖镜下分别对鲷鱼卵和仔稚鱼样品进行鉴定和计数,计数单位分别为粒和尾(ind.),鉴定主要依据鲷鱼卵和仔稚鱼的外部形态特征^[32-34],鲷的产卵习性^[35-36]及仔稚鱼的分布范围^[23]等。

调查网具网口配有流量计记录拖网过程中的滤水量,采样各站位同步采集环境因子数据,环境因子的采集使用Sea & Sun Tech CTD 60,测定的环境因子有海表面温度(Sea surface temperature, SST)、海表面盐度(Sea surface salinity, SSS)、海表面叶绿素质量浓度(Sea surface chlorophyll-a, SCHL)和水深(Depth)。

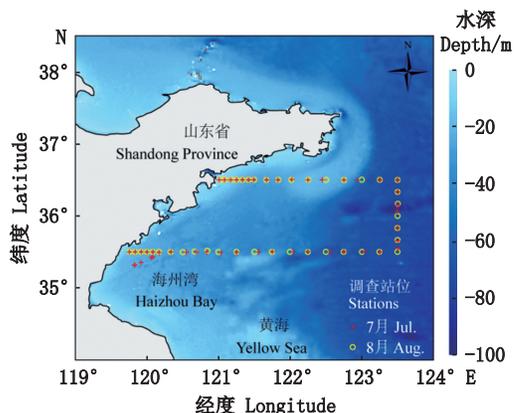


图1 2019年7、8月航次调查海域和站位设置
Fig. 1 Study area and spatial distribution of survey stations in July and August 2019

表1 2019年7、8月航次黄海中部断面调查时间及鲷鱼卵/仔稚鱼采集数量
Tab. 1 Survey time and number of anchovy eggs/larvae and juveniles collected in the middle section of the Yellow Sea in July and August 2019

航次 Cruises	站位数量 Number of stations	采样日期 Sampling date	卵数量 Number of egg/ind.	仔稚鱼数量 Number of larvae and juveniles/ind.
2019年7月	47	7月9—16日	77 827	76
2019年8月	42	8月14—21日	391	205

1.2 耳石微结构分析

从2019年采集的鲷仔稚鱼样品中,随机选取211尾仔稚鱼进行了耳石微结构分析。首先用目微尺在解剖镜下测量鲷仔稚鱼体长,即吻端到脊索末端的长度,精确到0.1 mm,然后在解剖镜下用解剖针挑开仔稚鱼头部取出较大的矢耳石放置在载玻片上,清理干净组织、黏液等杂物,将紫外光固化胶(Ultraviolet Rays)滴在耳石上用紫外线灯照射10 s左右,最后在奥林巴斯显微镜(BX53F)下放大400×观察,并拍照保存。根据耳石的对称性,随机取左右矢耳石之一进行计测^[37]。根据以往的研究,鲷耳石第1条轮纹形成在孵化后第4天,即仔鱼开始外源性摄食的时候,因此,耳石日轮数量加上3即为鲷仔稚鱼的日龄^[7]。

应用Image J软件测量矢耳石最大半径(Otolith radius, OR),精确到0.1 μm。日龄的计数从清晰可见的第1条轮纹开始,每个样本由同一个人间隔1个月读取两次,两次结果一致,则直接用于后续的数据分析,若两次读数结果不一致,则检查样本,再次进行读数,若仍然不一致则弃之不用。

1.3 数据分析

1.3.1 数据标准化

鲷鱼卵/仔稚鱼密度单位为每100立方米水体中出现的鲷鱼卵/仔稚鱼粒/尾数(ind./100 m³),计算公式如下:

$$W = 0.3 \times D \times A \times 100 \quad (1)$$

$$P = (N/W) \times 100 \quad (2)$$

式中: P 为单位体积海水里鲷鱼卵/仔稚鱼粒/尾数,ind./100 m³; N 为全网鲷鱼卵/仔稚鱼粒/尾数,ind.; W 为滤水量,100 m³; D 为流量计下网和起网时转数的差值; A 为所用网具的网口面积,m²; 0.3

为流量计的校正系数^[38]。

1.3.2 分布模型

广义加性模型 (Generalized additive model, GAM) 可以在不进行参数估计的前提下, 用于分析因变量和多个自变量的关系^[39], 其中 Tweedie 分布可用于处理非负、偏态的随机变量, 是一种泊松分布和伽马 (Gamma) 分布的复合分布, 由于鱼卵、仔稚鱼调查数据普遍存在低值多、高值少的现象, 往往需要对数据进行对数转化; Log 正态分布更具有适用性, 并且本文所使用的调查数据存在较多 0 值, 0-1 分布能直观地反映鱼卵和仔稚鱼是否出现, 因此, 本文选取了 Tweedie 分布、Gamma 分布、Log 正态分布、0-1 分布的 GAM 模型来探讨鳀鱼卵和仔稚鱼的分布与环境因子之间的关系。此外, 选取了 1 种机器学习方法随机森林 (Random forest, RF) 来进行比较, 随机森林是一种基于分类树的多功能机器语言学习算法, 具有提高预测精度、处理大量的定量和定性数据能力, 且不容易出现过度拟合等优点^[40]。

首先对鱼卵和仔稚鱼数据进行 $\lg(x+1)$ 的转化, 单位: ind./100 m³; Present 代表鱼卵/仔稚鱼出现与否, 值为 0 和 1, 0 代表未出现鱼卵/仔稚鱼, 1 代表出现鱼卵/仔稚鱼。模型选择的环境因子包括离岸距离 (Distance)、海水深度 (Depth)、SST、SSS、SCHL 等 5 个因子, 利用方差膨胀系数 (Variance inflation factor, VIF) 对所有的因子进行多重共线性检验, 筛选适合加入模型的因子^[41], 并在 5 种模型中加入经纬度交互项分析 (Lon, Lat) 即采样位置。VIF 阈值设为 3, 即 VIF>3 的解释变量在建模之前予以去除。

在构建 5 种分布模型的最优模型过程中, 结合赤池信息量准则 (Akaike information criterion, AIC)^[42] 和方差解释率, 在 AIC 最小的单因子预测函数的基础上依次加入其他因子, 不断重复此过程, 直到模型的 AIC 值不会随着新因子的加入而减小为止, 此时模型拟合效果最好。不同模型间的 AIC 值小于 2 视为差异不显著。

利用交叉验证的方法依次对 5 种分布模型的最优模型进行检验, 将原始数据集分为训练集 (随机抽取原始数据的 70% 来拟合模型) 和验证集 (剩下的 30% 进行验证), 对训练集得到的预测值和验证集的真实观测值进行线性回归并重复操作 100 次得到均方根误差 (Root mean squared

error, RMSE) 和拟合系数 R^2 来判断该模型的预测性能^[43]。综合 R^2 (越大越好)、RMSE (越小越好)、AIC 值 (越小越好) 和方差解释率等 4 个指标来筛选最优分布模型。

1.3.3 生长方程

基于耳石微结构分析, 有多种形式的生长模型适用于鱼类的早期生长, 本研究选用线性生长方程、指数生长方程、对数生长方程、幂函数生长方程、Logistic 生长方程、Gompertz 生长方程和 Von Bertalanffy 生长方程等^[44] 模型拟合鳀仔稚鱼的早期生长方程。

线性生长方程:

$$L_t = a + bt \quad (3)$$

指数生长方程:

$$L_t = ae^{bt} \quad (4)$$

对数生长方程:

$$L_t = a \ln t + b \quad (5)$$

幂函数生长方程:

$$L_t = at^b \quad (6)$$

Logistic 生长方程:

$$L_t = \frac{L_\infty}{1 + e^{-k(t-t_0)}} \quad (7)$$

Gompertz 生长方程:

$$L_t = L_0 e^{h(1 - e^{-gt})} \quad (8)$$

Von Bertalanffy 生长方程:

$$L_t = L_\infty [1 - e^{-k(t-t_0)}] \quad (9)$$

式中: L_t 为体长, mm; t 为日龄, d; L_0 为日龄为 0 时的理论体长; L_∞ 为渐近体长; t_0 为鱼类体长为 0 时的理论日龄; k 为相对生长速率的参数; a 、 b 、 g 、 h 为常数。

通过拟合系数 R^2 和 AIC 值^[45] 选择鳀仔稚鱼的最适生长模型。AIC 指数的计算公式如下:

$$I_{AIC} = n \ln (S_{RSS}/n) + 2k \quad (10)$$

式中: I_{AIC} 为赤池信息准则 AIC 值; n 为样本数量; S_{RSS} 为残差平方和; k 为生长方程中参数个数。

2 结果

2.1 鳀鱼卵、仔稚鱼的分布特征

两个调查航次共采集到 78 218 粒鱼卵和 281 尾仔稚鱼 (表 1)。7 月在山东半岛南部 35.5°N 断面海域形成鱼卵密集分布区, 8 月鱼卵密度显著下降, 密集分布区不太明显 (图 2); 从仔稚鱼密度分布上看, 7 月仅 2 个站位出现仔稚鱼分布, 8 月

在 123.5°E、35.5°N~36.5°N 纵向断面海域形成仔稚鱼密集分布区(图2)。

方差膨胀因子(VIF)分析表明在所有因子中,水深与其他因子存在较强共线性,因此将水深因子舍去,其他因子加入模型变量进一步筛选。结合 AIC 值和方差解释率对模型中的因子再次筛选,分别得到 5 种分布模型的最优模型(表2)。在这 5 种最优模型中,虽然 Gamma 分布

R^2 值最大,但方差解释率过高,存在过度拟合的风险。综合 4 种指标,Tweedie GAM 的拟合效果最好,以此类推在仔稚鱼的分布研究中也采用该模型(表3)。结合 AIC 值和方差解释率,分别构建鱼卵和仔稚鱼的最优 Tweedie GAM 分布模型:鱼卵为 $Y=s(X_{SST})+s(X_{Distance})+s(X_{SSS})+s(X_{Lon,Lat})$; 仔稚鱼为 $Y=s(X_{Lon,Lat})+s(X_{SSS})$ 。

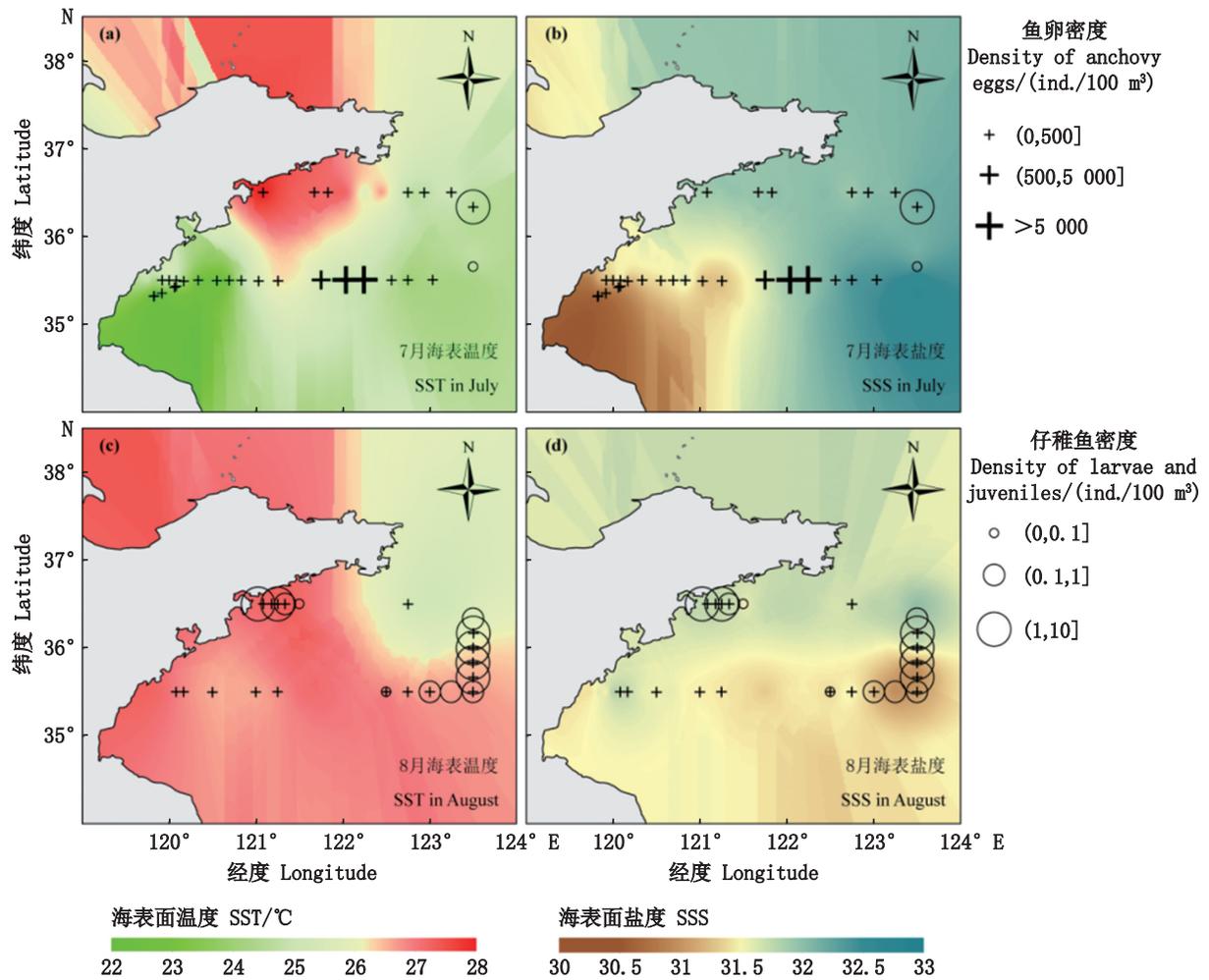


图2 7、8月航次鱼卵和仔稚鱼密度分布及其与海表面温度(a,c)、盐度(b,d)间的关系

Fig. 2 Density distribution of anchovy eggs, larvae and juveniles in July and August voyages and its relationship with sea surface temperature(a,c) and salinity(b,d)

鱼卵最优 Tweedie GAM 模型的累积方差解释率为 30.40%,其中海表面温度、离岸距离、海表面盐度、经纬度交互项的贡献率分别为 5.13%、7.47%、11.90%、5.90% (表3)。仔稚鱼最优 Tweedie GAM 模型的累计方差解释率为 75.20%,经纬度交互项的贡献率最大,为 62.80%,海水表层盐度的贡献率为 12.40%(表3)。

基于鱼卵密度调查数据的 Tweedie GAM 模型结果中(图3),鱼卵密度与 SST 之间呈现先平稳然后缓慢下降的趋势,在 23~25 °C 之间鱼卵密度没有明显波动,大于 25 °C 时,鱼卵密度随着温度的升高缓慢下降,鱼卵主要分布在温度为 23~26 °C 的区域内(图3a);鱼卵密度与离岸距离之间呈现明显的正相关关系,随着离岸距离的增

大显著增加(图 3b);鱼卵密度与 SSS 之间呈斜 S 形的结构,鱼卵主要分布在盐度为 30~32 的区域内,盐度超过 32 时,鱼卵密度随着盐度的升高显著下降(图 3c);采样位置对鱼卵密度也有影响,在南部 35.5°N 断面海域鱼卵分布较为集中(图 3d)。

基于仔稚鱼密度调查数据的 Tweedie GAM 模型结果显示(图 4),采样位置对仔稚鱼密

度有显著影响,仔稚鱼集中分布于 123.5°E、35.5°N~36.5°N 纵向断面海域(图 4a),并且与鱼卵相比,仔稚鱼的分布受采样位置影响更为显著;仔稚鱼密度与 SSS 之间呈偏拱形结构,仔稚鱼主要分布在盐度为 30~32 的区域内,在 31 左右达到峰值,盐度超过 31.5 时,仔稚鱼密度随着盐度的增大急剧减小(图 4b)。

表 2 鱼卵最优分布模型筛选结果

Tab. 2 Selection results of optimal distribution model of eggs

分布模型 Distribution model	最优模型表达式 Expression of optimal model	赤池信息 准则 AIC	拟合系数 R^2	均方根 误差 RMSE	方差解释率 Variance explanation/%
Tweedie 分布 GAM Tweedie distribution GAM	$Y=s(X_{SST})+s(X_{Distance})+s(X_{SSS})+s(X_{Lon,Lat})$	198.105	0.250	0.692	30.40
Gamma 分布 GAM Gamma distribution GAM	$Y=s(X_{Distance})+s(X_{SST})+s(X_{SSS})+s(X_{Lon,Lat})$	570.307	0.535	901.411	80.20
Log 正态分布 GAM Logarithmic normal distribution GAM	$Y=s(X_{SST})+s(X_{SSS})+s(X_{Lon,Lat})$	187.163	0.213	0.730	42.70
0-1 分布 GAM 0-1 distribution GAM	$Y=s(X_{SST})+s(X_{SSS})$	144.597	0.092	0.747	11.90
随机森林模型 Random forest model	$Y=s(X_{Distance})+s(X_{SST})+s(X_{SSS})+s(X_{Lon})+s(X_{Lat})$	-	0.185	0.719	21.04

注:Y 为响应变量;s 为自然样条平滑函数;Distance 为离岸距离;SST 为海水表层温度;SSS 为海水表层盐度;Lon, Lat 为经纬度交互项;Lon 为经度;Lat 为纬度。

Notes: Y indicates response variables; X indicates nature spline smoothing function; Distance indicates offshore distance; SST indicates sea surface temperature; SSS indicates sea surface salinity; Lon, Lat indicates interactions of longitude and latitude; Lon indicates longitude; Lat indicates latitude.

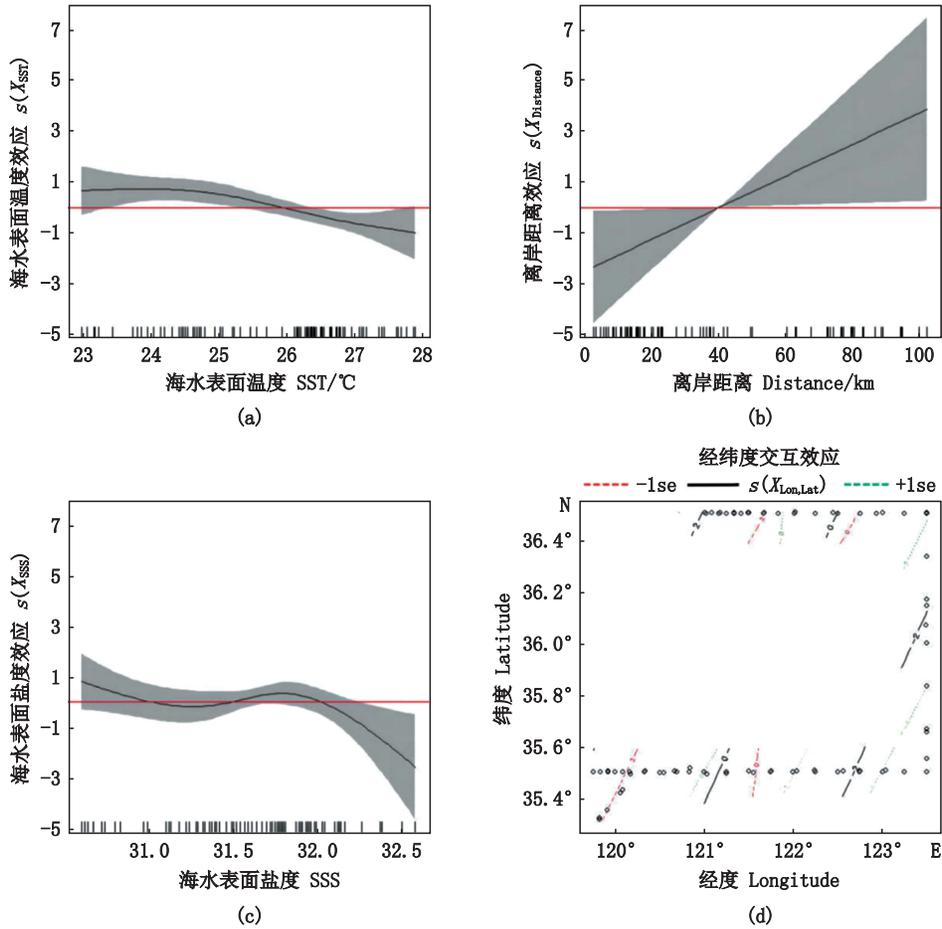
表 3 Tweedie GAM 模型拟合结果及各因子重要性

Tab. 3 Fitting results of Tweedie GAM model and analysis of important factors

鱼卵/仔稚 鱼 Eggs/ Larvae and juveniles	因子 Factors	P 值 P value	鱼卵/仔稚鱼 Eggs/Larvae and juveniles	加入的因子 Added factors	累计方差解释率 Accumulation of variance explanation/%	贡献率 Importance/%	赤池信息 准则 AIC
	海表面温度 SST	0.012*		海表面温度 SST	5.13	5.13	208.813
鱼卵 Eggs	离岸距离 Distance	0.036*	鱼卵 Eggs	+离岸距离 Distance	12.60	7.47	205.290
	海表面盐度 SSS	0.043*		+海表面盐度 SSS	24.50	11.90	200.532
	经纬度交互项 Lon,Lat	0.071		+经纬度交互项 Lon,Lat	30.40	5.90	198.105
仔稚鱼 Larvae and juveniles	经纬度交互项 Lon,Lat	0.001***	仔稚鱼 Larvae and juveniles	经纬度交互项 Lon,Lat	62.80	62.80	58.790
	海表面盐度 SSS	0.044*		+海表面盐度 SSS	75.20	12.40	51.150

注:“*”表示在 0.05 置信水平下显著;“**”表示在 0.01 置信水平下显著;“***”表示在 0.001 置信水平下显著;Distance 表示离岸距离;SST 表示海水表层温度;SSS 表示海水表层盐度;Lon, Lat 表示经纬度交互项;“+”表示添加变量。

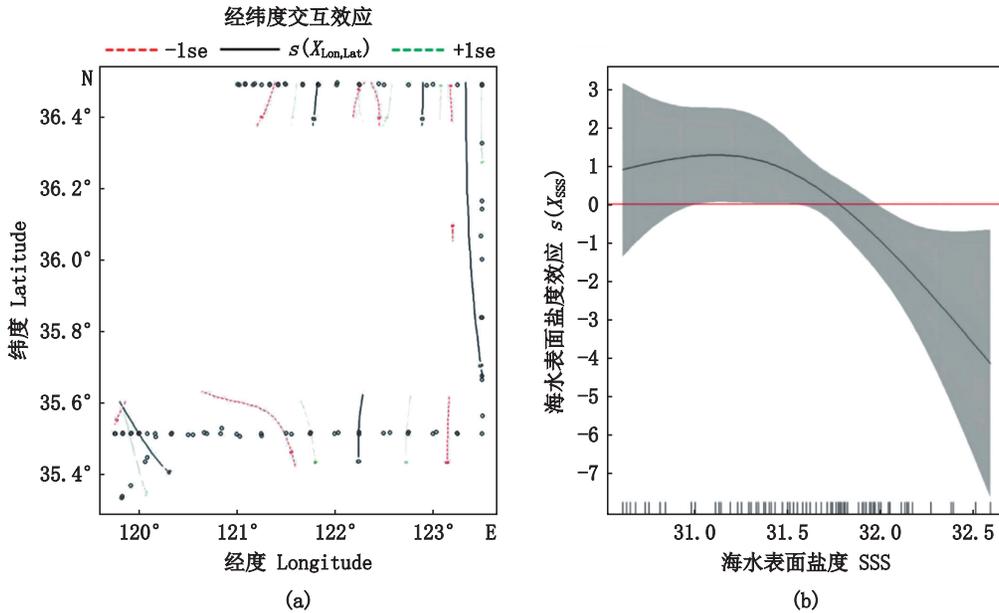
Notes: “*” indicates that the p value is obvious at the 0.05 confidence interval; “**” indicates that the p value is obvious at the 0.01 confidence interval; “***” indicates that the p value is obvious at the 0.001 confidence interval; Distance indicates offshore distance; SST indicates sea surface temperature; SSS indicates sea surface salinity; Lon, Lat indicates interactions of longitude and latitude; “+” indicates adding variables.



-1se. 区间下限;+1se. 区间上限;红色线.0值水平线。
 -1se. The lower limit of the interval; +1se. The upper limit of the interval; Red line. 0-value horizontal line.

图3 基于鱼卵密度调查数据的 Tweedie GAM 模型结果

Fig. 3 Results of Tweedie GAM model on the survey data of anchovy eggs density



-1se. 区间下限;+1se. 区间上限;红色线.0值水平线。
 -1se. The lower limit of the interval; +1se. The upper limit of the interval; Red line. 0-value horizontal line.

图4 基于仔稚鱼密度调查数据的 Tweedie GAM 模型结果

Fig. 4 Results of Tweedie GAM model on the survey data of anchovy larvae and juveniles density

2.2 仔稚鱼日龄和生长

7月航次捕获的鳀仔稚鱼体长为12~22 mm,平均体长为(14.88±2.20) mm,优势体长组为12~14 mm(图5a,表4);鉴定日龄69尾,日龄为16~36 d,平均日龄为(22.54±4.20) d,优势日龄组为20~22 d,平均耳石半径为(80.44±24.60) μm(图5b,表4)。8月航次捕获的鳀仔稚鱼体长为4~24 mm,平均体长为(13.34±3.00) mm,优势体长组为12~14 mm(图5a,表4);鉴定日龄142尾,日龄为12~40 d,平均日龄为(22.72±6.00) d,优势日龄组为18~20 d,平均耳石半径为(84.60±33.20) μm(图5b,表4)。

基于耳石微结构分析得到的日龄和捕获日期,逆推得到211个样本的孵化日期分布(图6)。2个航次捕获的鳀仔稚鱼的孵化日期分别集中在6月15日—6月25日(图6a)、7月14日—8月2日(图6b),孵化日期没有明显的峰值,且随着孵化日期的推后,孵化数量逐渐增多。

2.3 仔稚鱼生长特征

仔稚鱼体长与耳石半径呈明显的线性相关关系(图7),即体长增长率与耳石增长率是一致的。2个航次仔稚鱼耳石平均增量的变化特征的比较显示(图8),7月航次捕获的鳀仔稚鱼耳石增长率随日龄的变化范围为3.08~5.90 μm/d,耳石增长率随着日龄的增大呈现出较为平稳的上升

趋势,波动较小;8月航次捕获的鳀仔稚鱼耳石增长率随日龄的变化范围为3.40~5.65 μm/d,耳石增长率波动较为剧烈,在20日龄时急剧下降,随后呈缓慢上升趋势。

采用7种生长模型对鳀仔稚鱼的体长和日龄进行拟合(表5),AIC值最小且 R^2 最大的生长模型是幂函数生长模型,即鳀仔稚鱼体长与日龄的关系符合幂函数生长方程(图9)。

3 讨论

3.1 鳀鱼卵和仔稚鱼分布特征

结果显示,鱼卵密度最高的区域出现在山东半岛南部35.5°N断面海域,原因可能是:(1)每年5—7月鳀鱼卵随着潮汐锋向浅水区域移动,黄海中部由于等深线剧烈弯曲而形成的涡旋的存在,可能导致鱼卵在该区域聚集^[26,46]。(2)7月在海州湾中部存在一个较弱的表层冷水斑块即上升流和较强潮汐混合发生的区域^[47-48],是潮汐锋存在及分布区域的标志^[47],斑块的存在使得强上升流区鱼卵出现较少而下降流区的鳀大量聚集和产卵^[49]。仔稚鱼的空间分布相较鱼卵极不均匀,主要集中在纵向断面海域,原因可能是仔稚鱼和幼鱼具有一定的活动能力,特别是稚鱼和幼鱼已有明显的昼夜垂直移动现象^[50-51]并具备了主动索饵的习性^[52-53]。

表4 7、8月航次鳀仔稚鱼体长、耳石半径及日龄

Tab. 4 Length, otolith radius and age of anchovy larvae and juveniles in July and August voyages

航次 Cruises	日龄鉴定尾数 Number of otolith measurement/ind.	平均体长±标准差 Mean length±SD/mm	平均日龄±标准差 Average age±SD/d	平均耳石半径±标准差 Average otolith radius±SD/μm
2019年7月	69	14.88±2.20	22.54±4.20	80.44±24.60
2019年8月	142	13.34±3.00	22.72±6.00	84.60±33.20

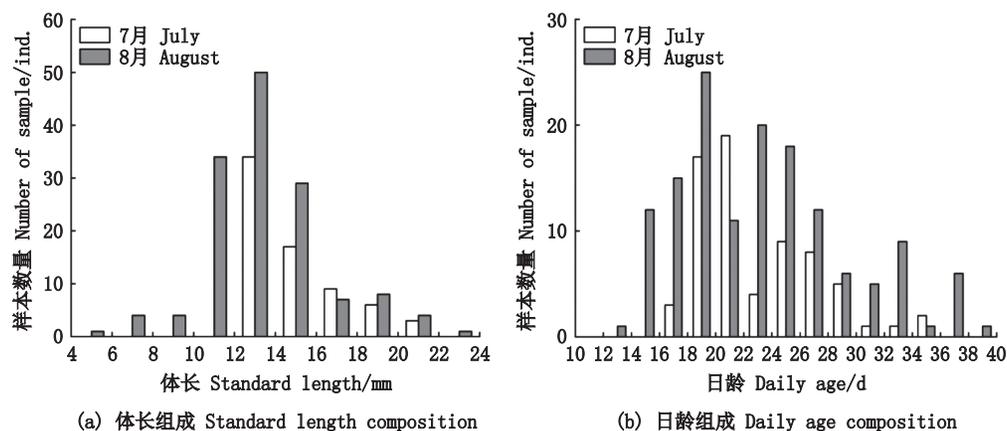


图5 7、8月航次鳀仔稚鱼体长、日龄组成

Fig. 5 Composition of standard length and daily age of anchovy larvae and juveniles in July and August voyages

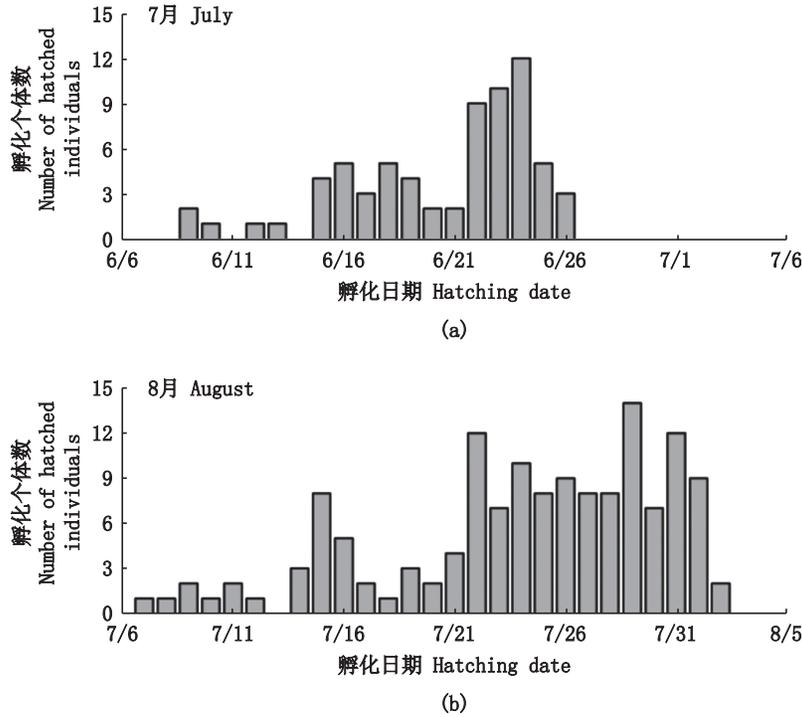


图6 7、8月航次鲷仔稚鱼孵化个体数分布
 Fig. 6 Distribution of hatched individuals of of anchovy larvae and juveniles in July and August voyages

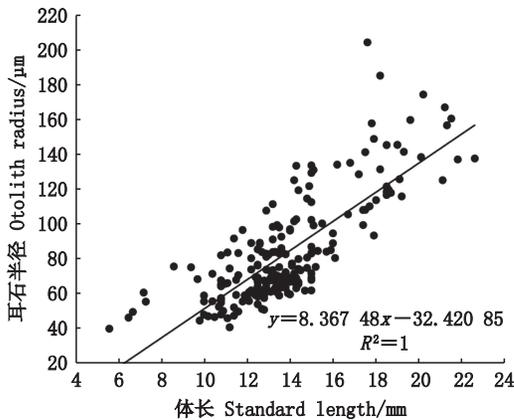


图7 7、8月航次鲷仔稚鱼体长与耳石半径之间的关系
 Fig. 7 Relationship between length of anchovy larvae and juveniles and otolith radius in July and August voyages

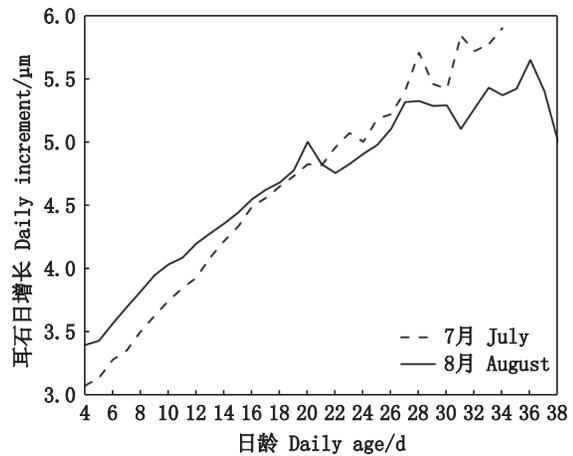


图8 7、8月航次鲷仔稚鱼耳石增长率变化特征
 Fig. 8 Variation characteristics of otolith growth rate of anchovy larvae and juveniles in July and August voyages

3.2 影响鲷鱼卵和仔稚鱼分布的环境因子

温度是影响鱼类洄游分布、集群、产卵和生长发育的重要环境因子^[54-55]。Tweedie GAM模型结果显示,鱼卵主要分布在表层水温23~26℃的范围内,而温度对仔稚鱼的分布没有显著影响。以往的研究发现黄海南部鲷鱼卵和仔稚鱼的分布对温度的要求更为严格^[56],而本研究中并没有发现温度对仔稚鱼的分布有显著影响,原因可能由于本研究海表面温度数据量有限且时间跨度小,此

外调查海域和调查时间的差异也会在一定程度上影响环境因子的重要性。鱼类在不同阶段(如受精、孵化、产卵等)的生长发育都与盐度密切相关^[57-60]。鱼卵和仔稚鱼集中分布的海域存在明显的表层温度峰和表层盐度峰现象,与黄海夏季冷水团和潮汐流交汇导致锋面冷斑的形成有密切联系^[47],冷斑引起水体发生垂直混合进而导致叶绿素、营养盐、饵料生物的增加^[61],为鱼卵的高质量发育和仔稚鱼的生存提供了良好的环境条件。

表5 7、8月航次鲱仔稚鱼的体长生长方程的参数值

Tab. 5 Parameter values of body length growth equation of anchovy larvae and juveniles in July and August voyages

生长方程 Growth equation	L_{∞}/L_0	$a/k/h$	$b/t_0/g$	拟合系数 R^2	赤池信息准则 AIC
线性生长方程 Linear growth equation	-	0.461	3.388	0.798	104.961
指数生长方程 Exponential growth equation	-	6.814	0.031	0.787	116.352
对数生长方程 Logarithmic growth equation	-	10.773	-19.476	0.794	109.817
幂函数生长方程 Power-exponential growth equation	-	1.292	0.762	0.799	103.755
Logistic 生长方程 Logistic growth equation	29.484	0.064	24.590	0.795	109.628
Gompertz 生长方程 Gompertz growth equation	2.520	0.996	-0.031	0.786	118.352
Von Bertalanffy 生长方程 Von Bertalanffy growth equation	70.533	0.008	-3.856	0.798	106.425

注: L_0 为日龄为 0 时的理论体长; L_{∞} 为渐近体长; t_0 为鱼类体长为 0 时的理论日龄; k 为相对生长速率的参数; a 、 b 、 g 、 h 为常数。

Notes: L_0 is the theoretical body length at the age of 0; L_{∞} is the asymptotic body length; t_0 is the theoretical age of fish when its body length is 0; k is the parameter of relative growth rate; a , b , g , h are constants.

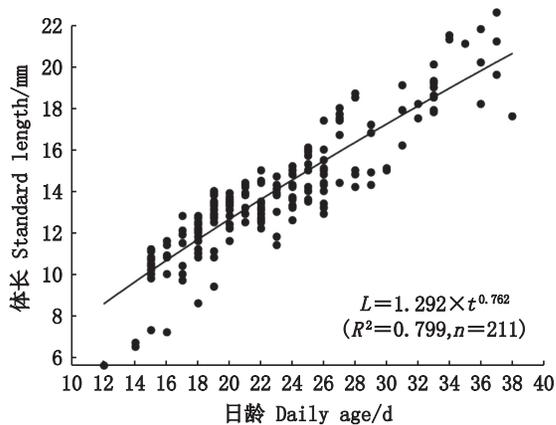


图9 7、8月航次鲱仔稚鱼体长与日龄的关系

Fig. 9 Relationship between standard length and age of anchovy larvae and juveniles in July and August voyages

值得注意的是采样位置因子均出现在鱼卵和仔稚鱼的最优 Tweedie GAM 模型中,这可能是因为本研究调查海域位于近岸,不仅是夏季黄海冷水团覆盖区,并且在近岸与离岸海域之间的过渡地带,会因为地形作用以及潮汐混合的空间变化形成潮汐峰^[62],峰区的物理特性及生物特性会对鱼卵和仔稚鱼的分布、聚集和运输产生重要影响^[46,63-65]。

3.3 Tweedie GAM 模型

鱼卵最优 Tweedie GAM 分布模型的方差解释率为 30.40%,模型拟合效果较好;仔稚鱼最优 Tweedie GAM 分布模型的方差解释率为 75.20%,解释率较大,存在过度拟合的风险。这可能是由于在 7、8 月份鲱鱼进入索饵期,仔稚鱼相比鱼卵已经具备主动索饵的能力并向深水区移动,而本研究调查海域在黄海中部近岸,仔稚鱼相比鱼卵 0 值数据过多,过多的 0 值也会增加估计模型参数的偏差和不确定性^[66-67],另外较短的时间序列也限制了模型的较好拟合。虽然统计模型在一

定程度上能大致描述鱼卵和仔稚鱼的分布规律,但对于它们的分布机制解释有限,特别是在数据量较少的情况下即使一些已被证实适用的模型表现也不是很好,还需完善和发掘最优模型并结合生理学研究深入剖析,像鱼卵这种营随波逐流的漂流生活方式也受水动力条件的影响,即使其孵化较短但可能会随海流改变分布模式。

3.4 鲱仔稚鱼生长特征

鲱仔稚鱼耳石微结构的研究结果表明体长与耳石半径之间存在显著的正相关关系,本结果与孟田湘^[17]的研究结果一致,说明仔稚鱼耳石的生长与仔稚鱼体长之间存在显著关联,耳石的生长可以反映鱼体的生长情况。孵化日期是影响仔稚鱼早期生活史阶段生长速率的关键因素,生长速率随日龄增加而逐渐增加的生长模式已被证实。耳石增长率随日龄变化特征的结果显示,20 日龄前 8 月航次个体的耳石增长率要大于 7 月航次,但 7 月航次的大个体数量占比较大,随着大个体的加入,7 月航次的个体在 20 日龄后的耳石增长率大于 8 月航次并保持较快增长的趋势;8 月航次的个体在 20 日龄时耳石增长率急剧下降,这可能与温度过高有关系,有研究^[10,68]表明在 20~26 °C 时,鲱仔稚鱼的生长速率与海表面温度呈正相关关系,而 8 月一些仔稚鱼分布的海域水体表层温度已经达到了 26 °C 以上,过高的温度使生长速率增加的同时,加速代谢导致储存下来用来生长的能量减小^[69],这可能是导致 8 月航次个体的耳石增长率在 20 日龄时急剧下降的原因之一。

4 结论和展望

调查期间,在 35.5° N 和 123.5° E、35.5° N~

36.5°N 断面海域分别形成鳀鱼卵和仔稚鱼密集分布区。最优 Tweedie GAM 分布模型显示盐度对鱼卵和仔稚鱼的分布都有显著影响,最适盐度为 30~32;温度仅对鱼卵的分布有显著影响,最适温度为 23~26 °C。2 个航次捕获的鳀仔稚鱼的孵化日期分别集中在 6 月 15 日—6 月 25 日、7 月 14 日—8 月 2 日,孵化日期没有明显的峰值,且随着孵化日期的推后,孵化数量逐渐增多。鳀仔稚鱼体长为 4~24 mm,优势体长组为 12~14 mm,日龄为 12~40 d,优势日龄组为 18~20 d,耳石增长率为 3.08~5.90 $\mu\text{m}/\text{d}$ 。鳀仔稚鱼体长与日龄的关系符合幂函数生长方程。

本研究一定程度上补充了鳀早期生活史阶段的基础资料,但仍然存在一些不足需要在后续的研究中深入。一是样品时间跨度小,未能涵盖鳀的整个产卵盛季,站位设置也较为固定,无法对不同海域的样本进行比较;二是调查获取的环境因子虽然能在一定程度上反映环境变化对鳀鱼卵和仔稚鱼分布的影响,但缺乏海流、气候因子等相关数据。

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] 李向心. 基于个体发育的黄渤海鳀种群动态模型研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
LI X X. Study on individual-based model of anchovy population dynamics in the Huanghai Sea and Bohai Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [3] TAKESHIGE A, MIYAKE Y, NAKATA H, et al. Effect of wind stress on the catch of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* off northwestern Kyushu, Japan [J]. Fisheries Science, 2013, 79(6):989-998.
- [4] TAKESHIGE A, MIYAKE Y, NAKATA H, et al. Simulation of the impact of climate change on the egg and larval transport of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) off Kyushu Island, the western coast of Japan [J]. Fisheries Oceanography, 2015, 24(5):445-462.
- [5] HJORT J. Fluctuations in the great fisheries of northern Europe viewed in the light of biological research [C]. ICES, 1914.
- [6] 汪珂,刘凯,徐东坡,等. 鱼类早期资源研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(5):1098-1107.
WANG K, LIU K, XU D P, et al. Advances in research on early life resources of fish [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2013, 35(5): 1098-1107.
- [7] TSUJI S, AOYAMA T. Daily growth increments in otoliths of Japanese anchovy larvae *Engraulis japonica* [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1984, 50(7): 1105-1108.
- [8] TAKAHASHI M, WATANABE Y, KINOSHITA T, et al. Growth of larval and early juvenile Japanese anchovy, *Engraulis japonicus*, in the Kuroshio-Oyashio transition region [J]. Fisheries Oceanography, 2001, 10(2): 235-247.
- [9] TAKASUKA A, AOKI I, MITANI I. Evidence of growth-selective predation on larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in Sagami Bay [J]. Marine Ecology Progress Series, 2003, 252: 223-238.
- [10] TAKASUKA A, AOKI I. Environmental determinants of growth rates for larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in different waters [J]. Fisheries Oceanography, 2006, 15(2): 139-149.
- [11] YASUE N, TAKASUKA A. Seasonal variability in growth of larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* driven by fluctuations in sea temperature in the Kii Channel, Japan [J]. Journal of Fish Biology, 2009, 74(10): 2250-2268.
- [12] YAMAMOTO K, SAITO M, YAMASHITA Y. Relationships between the daily growth rate of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* larvae and environmental factors in Osaka Bay, Seto Inland Sea, Japan [J]. Fisheries Science, 2018, 84(2): 373-383.
- [13] 陈介康. 黄海北部日本鳀鱼食性的研究[R]. 辽宁省海洋水产研究所调查报告, 1978, 43: 1-11.
CHEN J K. Studies on the feeding of anchovy (*Engraulis japonicus*) in the Northern Yellow Sea [R]. Cruise Report of Liaoning Marine Fisheries Research Institute, 1978, 43: 1-11.
- [14] 李培军,秦玉江,陈介康. 黄海北部日本鳀的年龄与生长[J]. 水产科学, 1982(1): 1-5.
LI P J, QIN Y J, CHEN J K. Age and growth of anchovy *Engraulis japonicus* in northern Yellow Sea [J]. Fisheries Science, 1982(1): 1-5.
- [15] YU H T, LEE Y J, HUANG S W, et al. Genetic analysis of the populations of Japanese anchovy (*Engraulidae*: *Engraulis japonicus*) using microsatellite DNA [J]. Marine Biotechnology, 2002, 4(5): 471-479.
- [16] ZHAO X, HAMRE J, LI F, et al. Recruitment, sustainable yield and possible ecological consequences of the sharp decline of the anchovy (*Engraulis japonicus*) stock in the Yellow Sea in the 1990s [J]. Fisheries Oceanography, 2003, 12(4/5): 495-501.
- [17] 孟田湘. 山东半岛南部产卵场鳀鱼幼体日龄组成与生长[J]. 海洋水产研究, 2004, 25(2): 1-5.
MENG T X. Daily age composition and growth rate of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) larvae in the

- southern waters of Shandong Peninsula [J]. Progress in Fishery Sciences, 2004, 25(2): 1-5.
- [18] 牛明香. 基于海洋遥感和GIS的黄海鲱鱼种群时空动态及对海洋环境因子的响应[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- NIU M X. Spatiotemporal dynamics of anchovy population and its response to environmental factors in the Yellow Sea based on ocean RS and GIS [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012.
- [19] 牛明香, 王俊, 袁伟, 等. 黄海鲱鱼时空分布季节差异分析[J]. 生态学杂志, 2013, 32(1): 114-121.
- NIU M X, WANG J, YUAN W, et al. Seasonal dissimilarity of *Engraulis japonicus* spatiotemporal distribution in Yellow Sea[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(1): 114-121.
- [20] 朱文斌, 朱海晨, 王雅丽, 等. 基于线性混合效应模型的本国幼鱼叉长-体重关系异质性[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4532-4538.
- ZHU W B, ZHU H C, WANG Y L, et al. Heterogeneity of fork length-weight relationship for juvenile *Engraulis japonicus* based on linear mixed-effects models[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(12): 4532-4538.
- [21] 朱文斌, 朱海晨, 张亚洲, 等. 浙江沿岸日本幼鱼数量分布及其与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2021, 28(9): 1175-1183.
- ZHU W B, ZHU H C, ZHANG Y Z, et al. Quantitative distribution of juvenile *Engraulis japonicus* and the relationship with environmental factors along the Zhejiang coast[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(9): 1175-1183.
- [22] 李秀梅, 叶振江, 李增光, 等. 黄海中部近岸产卵场日本幼鱼叉长-体重的时空变化[J]. 中国海洋大学学报, 2016, 46(2): 54-60.
- LI X M, YE Z J, LI Z G, et al. Spatial and temporal changes of the egg size of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) inhabiting the near shore spawning ground of central Yellow Sea [J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(2): 54-60.
- [23] 万瑞景, 魏皓, 孙珊, 等. 山东半岛南部产卵场鲱鱼的产卵生态 I. 鲱鱼鱼卵和仔稚幼鱼的数量与分布特征[J]. 动物学报, 2008, 54(5): 785-797.
- WAN R J, WEI H, SUN S, et al. Spawning ecology of the anchovy *Engraulis japonicus* in the spawning ground of the Southern Shandong Peninsula I. Abundance and distribution characters of anchovy eggs and larva [J]. Acta Zoologica Sinica, 2008, 54(5): 785-797.
- [24] 叶懋中, 章隼. 黄渤海区鲱鱼的分布、洄游和探察方法[J]. 水产学报, 1965, 2(2): 27-34.
- YE M Z, ZHANG S. The distribution and behaviour of *Engraulis japonicus* Temminck and Schlegel and its detection in the North China Seas (Hwang-Hai and Po-Hai) [J]. Journal of Fisheries of China, 1965, 2(2): 27-34.
- [25] 张仁斋, 陆穗芬. 中国近海鱼卵与仔鱼[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- ZHANG R Z, LU S F, et al. Fish eggs and larvae in offshore waters of China [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985.
- [26] 姜言伟. 海州湾经济鱼类产卵场鱼卵的数量分布[J]. 海洋水产研究丛刊, 1964, 18: 100-111.
- JIANG Y W. The quantity distribution of economic fish eggs in Haizhou Bay [J]. Journal of Marine Fisheries Research, 1964, 18: 100-111.
- [27] 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.
- 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.
- [28] LIN C, NING X, SU J, et al. Environmental changes and the responses of the ecosystems of the Yellow Sea during 1976-2000 [J]. Journal of Marine Systems, 2005, 55(3/4): 223-234.
- [29] 罗晓凡, 魏皓, 袁承仪. 利用卫星资料分析黄海海表温度的年际与年代际变化[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(10): 19-25.
- LUO X F, WEI H, YUAN C Y. Inter-annual and decadal variations of sea surface temperature in the Yellow Sea by satellite data [J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(10): 19-25.
- [30] 谭红建, 蔡榕硕, 黄荣辉. 中国近海海表温度对气候变暖及暂缓的显著响应[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(6): 500-507.
- TAN H J, CAI R S, HUANG R H. Enhanced responses of sea surface temperature over offshore China to global warming and hiatus [J]. Climate Change Research, 2016, 12(6): 500-507.
- [31] 国家海洋局. GB/T 12763. 6-2007 海洋调查规范第6部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 168.
- State Oceanic Administration. GB/T12763. 6-2007 Specifications for Oceanographic Survey-Part 6: marine biological survey [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 168.
- [32] FUKUHARA O. Development and growth of laboratory reared *Engraulis japonica* (Houttuyn) larvae [J]. Journal of Fish Biology, 1983, 23(6): 641-652.
- [33] 江素菲, 郑小衍. 闽南一台湾浅滩渔场鲱鱼卵和仔鱼的形态特征及其产卵场[J]. 台湾海峡, 1984(2): 224-231.
- JIANG S F, ZHENG X Y. The morphological characters of

- eggs and larvae of *Engraulis japonicus* Temminck et Schlegel and its spawning areas in the fishing ground of the South Fujian and Taiwan Bank [J]. Taiwan Strait, 1984 (2): 224-231.
- [34] 万瑞景, 姜言伟. 渤海硬骨鱼类鱼卵和仔稚鱼分布及其动态变化[J]. 中国水产科学, 1998, 5(1): 43-50.
WAN R J, JIANG Y W. The distribution and variation of eggs and larvae of osteichthyes in the Bohai Sea [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1998, 5(1): 43-50.
- [35] 万瑞景, 姜言伟. 渤海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
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.
- [36] 万瑞景, 赵宪勇, 魏皓. 山东半岛南部产卵场鳀鱼的产卵生态 II. 鳀鱼的产卵习性和胚胎发育特性[J]. 动物学报, 2008, 54(6): 988-997.
WAN R J, ZHAOX Y, WEI H. Spawning ecology of the anchovy *Engraulis japonicus* in the spawning ground of the Southern Shandong Peninsula II. spawning habits and embryonic developmental characteristics of the anchovy [J]. Acta Zoologica Sinica, 2008, 54(6): 988-997.
- [37] WANG Y T, TZENG W N. Differences in growth rates among cohorts of *Engraulis japonicus* larvae in the coastal waters off Tanshui River Estuary, Taiwan, as indicated by otolith microstructure analysis [J]. Journal of Fish Biology, 1999, 54(5): 1002-1016.
- [38] 国家海洋局. GB17378.7—2007 海洋监测规范第 7 部分: 近海污染生态调查和生物监测[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
State Oceanic Administration. GB17378.7-2007 The specification for marine monitoring-Part 7: Ecological survey for offshore pollution and biological monitoring[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [39] BELLIDO J M, PIERCE G J, WANG J. Modelling intra-annual variation in abundance of squid *Loligo forbesi* in Scottish waters using generalised additive models [J]. Fisheries Research, 2001, 52(1/2): 23-39.
- [40] LINDNER C, BROMILEY P A, IONITA M C, et al. Robust and accurate shape model matching using random forest regression-voting [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(9): 1862-1874.
- [41] KABACOFF R I. R in action: data analysis and graphics with R[M]. Greenwich: Manning Publications, 2011: 1-474.
- [42] BURNHAM K P, ANDERSON D R. Model selection and inference: a practical information-theoretic approach [M]. 2nd ed. New York: Springer, 2002: 175-196.
- [43] 孙霄, 张云雷, 徐宾铎, 等. 海州湾及邻近海域短吻红舌鳀产卵场的生境适宜性[J]. 中国水产科学, 2020, 27(12): 1505-1514.
SUN X, ZHANG Y L, XU B D, et al. Habitat suitability of *Cynoglossus joyneri* spawning grounds in Haizhou Bay and adjacent waters [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(12): 1505-1514.
- [44] 花传祥, 高玉珍, 朱清澄, 等. 基于耳石微结构的西北太平洋秋刀鱼 (*Cololabis saira*) 年龄与生长研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(10): 46-53.
HUA C X, GAO Y Z, ZHU Q C, et al. Age and growth of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the northwest Pacific Ocean based on statolith microstructure [J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(10): 46-53.
- [45] 陈琪. 基于耳石微结构分析东海带鱼 (*Trichiurus japonicus*) 早期生长与环境的关系[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2020.
CHEN Q. The relationship between early growth of young-of-the-year largehead hairtail (*Trichiurus japonicus*) and environmental variables in the East China Sea based on otolith microstructure analysis [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2020.
- [46] 魏皓, 王玉衡, 万瑞景, 等. 黄海锋区环流与鳀鱼卵的聚集[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(3): 512-516.
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.
- [47] LÜX G, QIAO F L, XIA C S, et al. Upwelling and surface cold patches in the Yellow Sea in summer: Effects of tidal mixing on the vertical circulation [J]. Continental Shelf Research, 2010, 30(6): 620-632.
- [48] LIE H J. Summertime hydrographic features in the southeastern Hwanghae [J]. Progress in Oceanography, 1986, 17(3/4): 229-242.
- [49] 张文超. 黄海鳀与蓝点马鲛产卵策略研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2022.
ZHANG W C. Spawning strategies of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* and Japanese Spanish mackerel *Scomberomorus niphonius* in the Yellow Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2022.
- [50] 殷名称. 鱼类生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 57-61.
YIN M C. Fish ecology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 57-61.
- [51] COOMBS S H, PIPE R K, MITCHELL C E. The vertical distribution of eggs and larvae of Blue whiting (*Micromesistius poutassou*) and Mackerel (*Scomber scombrus*) in the eastern North Atlantic and North Sea [J]. Rapports et Procès-Verbaux des Réunions du Conseil

- Permanent International pour l'Exploration de la Mer, 1981.
- [52] GRAVE H. Food and feeding of mackerel larvae and early juveniles in the North Sea [J]. Rapp. P-v. Réun. Cons. Int. Explor. Mer, 1981, 178: 454-459.
- [53] GRØNKJÆR P, CLEMMESSEN C, ST. JOHN M. Nutritional condition and vertical distribution of Baltic cod larvae [J]. Journal of Fish Biology, 1997, 51(sA): 352-369.
- [54] 陶雨薇, 王远坤, 王栋, 等. 三峡水库坝下水温变化及其对鱼类产卵影响 [J]. 水力发电学报, 2018, 37(10): 48-55.
- TAO Y W, WANG Y K, WANG D, et al. Assessing water temperature variations and impacts on fish spawning downstream of Three Gorges Dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(10): 48-55.
- [55] 李雪渡. 海水温度与渔场之间的关系 [J]. 海洋学报, 1982, 4(1): 103-113.
- 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.
- [56] 万瑞景, 黄大吉, 张经. 东海北部和黄海南部鳀鱼卵和仔稚幼鱼数量、分布及其与环境条件的关系 [J]. 水产学报, 2002, 26(4): 321-330.
- WAN R J, HUANG D J, ZHANG J. Abundance and distribution of eggs and larvae of *Engraulis japonicus* in the Northern part of East China Sea and the Southern part of Yellow Sea and its relationship with environmental conditions [J]. Journal of Fisheries of China, 2002, 26(4): 321-330.
- [57] PARRISH R H, NELSON C S, BAKUN A. Transport mechanisms and reproductive success of fishes in the California Current [J]. Biological Oceanography, 1981, 1(2): 175-203.
- [58] 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.
- 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.
- [59] 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.
- 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.
- [60] 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, 44(5): 151-158.
- WANG Y F, ZHU X H. A review on impact of salinity on patterns of fish ecophysiology [J]. Studia Marina Sinica, 2002, 44(5): 151-158.
- [61] TANG D L, KAWAMURA H, DIEN T V, et al. Offshore phytoplankton biomass increase and its oceanographic causes in the South China Sea [J]. Marine Ecology Progress Series, 2004, 268: 31-41.
- [62] 赵保仁. 黄海冷水团锋面与潮混合 [J]. 海洋与湖沼, 1985, 16(6): 451-460.
- ZHAO B R. The fronts of the Huanghai Sea cold water mass induced by tidal mixing [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1985, 16(6): 451-460.
- [63] ITOH S, YASUDA I, NISHIKAWAH, et al. Transport and environmental temperature variability of eggs and larvae of the Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) and Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western North Pacific estimated via numerical particle-tracking experiments [J]. Fisheries Oceanography, 2009, 18(2): 118-133.
- [64] BOLDT J L, THOMPSON M, ROOPER C N, et al. Bottom-up and top-down control of small pelagic forage fish: Factors affecting age-0 herring in the Strait of Georgia, British Columbia [J]. Marine Ecology Progress Series, 2019, 617-618: 53-66.
- [65] DO SOUTO M, SPINELLI M L, BROWN D R, et al. Benefits of frontal waters for the growth of *Engraulis anchoita* larvae: The influence of food availability [J]. Fisheries Research, 2018, 204: 181-188.
- [66] MARTIN T G, WINTLE B A, RHODES J R, et al. Zero tolerance ecology: improving ecological inference by modelling the source of zero observations [J]. Ecology Letters, 2005, 8(11): 1235-1246.
- [67] MACKENZIE D I, NICHOLS J D, LACHMAN G B, et al. Estimating site occupancy rates when detection probabilities are less than one [J]. Ecology, 2002, 83(8): 2248-2255.
- [68] HWANG S D, SONG M H, LEE T W, et al. Growth of larval Pacific anchovy *Engraulis japonicus* in the Yellow Sea as indicated by otolith microstructure analysis [J]. Journal of Fish Biology, 2006, 69(6): 1756-1769.
- [69] HØIE H, FOLKVORD A, JOHANNESSEN A. Maternal, paternal and temperature effects on otolith size of young herring (*Clupea harengus* L.) larvae [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1999, 234(2): 167-184.

Distribution and early growth characteristics of anchovy eggs, larvae and juveniles in the central Yellow Sea in summer

LIU Hao, ZHANG Wenchao, LI Wenjia, LIU Shuhao, TIAN Hao, WANG Yihan, YE Zhenjiang, TIAN Yongjun

(College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong, China)

Abstract: Anchovy (*Engraulis japonicus*) is an important fishing target in the Yellow Sea, and it is also the main prey for large fishes such as Japanese-Spanish mackerel. Exploring the distribution and early growth characteristics of anchovy is important for understanding of the recruitment mechanism. In this study, based on the survey data of the cross-section in the central Yellow Sea in the summer of 2019, the relationship between the distribution of eggs, larvae and juveniles and environmental factors was investigated using Tweedie GAM model. Furthermore, based on the otolith microstructure analysis, the daily age and body length composition of larvae and juveniles were estimated, and the early growth equation of power function was constructed by extrapolating the hatching date. The results showed that in the summer of 2019, a dense distribution area of anchovy eggs occurred in the line section of 35.5°N in the south of Shandong Peninsula, and the dense distribution area of larvae and juveniles occurred in the area of 35.5°N–36.5°N along 123.5°E longitudinal sections. Salinity has a significant effect on the distribution of anchovy eggs, larvae and juveniles, the optimum salinity range was 30–32, on the other hand, the water temperature only has a significant effect on the distribution of anchovy eggs, and the optimum temperature range was 23–26 °C. Analysis of daily otolith increment for 211 larvae and juveniles showed that the range of body length was 4–24 mm with the dominant length group of 12–14 mm, the age range was 12–40 days with dominant age group of 18–20 days, and the otolith growth rate ranged from 3.08 μm/d to 5.90 μm/d. The variation pattern in the daily otolith growth rate of larvae and juveniles was different between samples in July and August, which might be related to the difference in the water temperature between different months. This study provides scientific basis for the early growth and recruitment mechanism of anchovy resources.

Key words: anchovy; eggs; juvenile fish; distribution; early growth