

DOI: 10.12264/JFSC2020-0343

长江口凤鲚仔稚鱼主要繁殖季节的时空分布特征

胡丽娟^{1,2}, 宋超^{2,3,4}, 耿智^{2,3,4}, 赵峰^{1,2,3,4}, 蒋俊^{1,2}, 刘若晖^{1,2}, 庄平^{1,2,3,4}

1. 上海海洋大学, 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306;
2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部东海与长江口渔业资源环境科学观测实验站, 上海 200090;
3. 上海长江口渔业资源增殖与生态修复工程技术研究中心, 上海 200090;
4. 中国水产科学研究院长江口渔业生态重点实验室, 上海 200090

摘要: 为掌握凤鲚(*Coilia mystus*)早期资源在长江口的时空分布特征, 于2019年5—10月在长江口沿岸水域设置10个调查站点, 对凤鲚的仔、稚鱼及其环境因子进行逐月采样, 统计分析了凤鲚的体长、发育期及丰度等数据, 研究了凤鲚在长江口的主要繁殖时间及早期个体分布情况, 并利用 GAM 模型分析了丰度分布与环境因子的相关性。结果表明, 5—10月是长江口凤鲚的主要繁殖期, 其中5—8月为繁殖盛期。长江口北支的东旺沙-北八潞-启隆乡沿岸水域为凤鲚仔稚鱼主要分布水域, 为长江口凤鲚的重要育幼场。GAM 分析结果表明, 长江口凤鲚仔稚鱼的分布主要受盐度、温度和溶解氧的影响, 3个环境因子均对凤鲚仔稚鱼丰度的影响显著($P < 0.05$), GAM 最优模型偏差解释率为 65.50%。凤鲚仔稚鱼的最适盐度在 5~12, 温度在 20~28 °C 时相对适宜, 凤鲚仔稚鱼生长适宜的溶解氧为 5.2~8.0 mg/L。

关键词: 凤鲚; 仔稚鱼; 时空分布; GAM 模型; 长江口

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)09-1152-10

凤鲚(*Coilia mystus*)属鲱形目(Clupeiformes), 鳀科(Engraulidae), 鲚属, 俗称凤尾鱼、籽鲚、烤籽鱼, 是我国一种重要的经济鱼类, 在我国黄渤海、东海和南海均有分布^[1]。在长江口及其邻近海域, 每年4月下旬, 成熟的风鲚个体集群洄游至河口咸淡水水域进行繁殖, 产卵结束后, 亲鱼返回近海, 仔稚幼鱼在长江口觅食^[2]。近30年来, 由于过度捕捞、栖息生境破坏等原因, 导致长江口水域凤鲚资源日渐衰退^[3-4]。为了恢复长江口凤鲚资源, 并进行科学保育, 许多学者将关注点放在早期资源的相关研究上^[5-7]。早期研究认为长江口凤鲚产卵场主要集中于崇明岛附近, 以及长兴岛和横沙一带水域^[8]。倪勇等^[9]研究发现凤鲚产卵场位于长江口崇明老鼠沙至九段沙一带水域, 刘

凯等^[3]研究表明长江口凤鲚生殖群体主要分布于崇明岛南支水域。然而, 近年来的调查研究发现, 在长江口北支的东旺沙水域也可能存在凤鲚的产卵繁育场^[10]。因此, 在当前环境变迁的背景下, 查明长江口凤鲚仔稚鱼的时空分布, 探明产卵繁育场位置, 对于长江口凤鲚资源的保育十分重要。

鱼类早期个体游泳能力弱, 其分布和移动受水文环境影响很大, 由于长江口的水文环境情况复杂多变, 长江口径流变化、海水上溯造成的盐度变化、输沙量减少引起的透明度的变化等都有可能对凤鲚及其产卵场、育幼场的改变^[5]。因此, 随着环境变迁和凤鲚资源不断衰退^[4], 探明长江口凤鲚早期资源的时空分布现状及其环境影

收稿日期: 2020-11-02; 修订日期: 2020-12-07。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901202); 上海市自然科学基金项目(19ZR1470200); 上海市科技兴农重点攻关项目(2017-02-08-00-07-F00075); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2020TD13)。

作者简介: 胡丽娟(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水生生物生理生态学。E-mail: hulj952020@163.com

通信作者: 赵峰(1978-), 研究员, 从事渔业生态和保护生物学研究。E-mail: zhaof@ccsf.ac.cn

响尤为重要。广义加性模型(generalized additive models, GAM)是基于统计回归分析的一种方法,作为生态学空间格局分析的重要方法之一,近年来在渔业资源分布与环境相关性分析中得到了广泛应用^[11-12]。本研究通过研究凤鲚仔稚鱼在长江口的时空分布及环境相关性,旨在了解凤鲚早期资源的生境需求,为探明长江口凤鲚产卵场和育幼场提供基础资料,以期为进一步保护和管理凤鲚资源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 调查区域与采样方法

2019年5月至10月在长江口水域(30°50'58.36"~31°49'30.84"N、121°10'50.34"~121°58'53.10"E)设置10个调查站位(图1)。按照《海洋调查规范》(GB/T 12763.6-2007)^[13],使用浮游生物网(I型)(网长145 cm,网口内径50 cm,网口面积0.2 m²,网目0.505 mm),在每月的大潮进行水平拖网采

样,每站拖网10 min,拖网速度为2 nmile/h,用网口流量计计算滤水体积。所采集样品现场进行初步处理后分别用5%甲醛和95%乙醇保存,带回实验室进一步做形态和分子鉴定分析。

1.2 数据处理与分析

1.2.1 种类鉴定与测量 对所采集的样品在解剖镜下进行形态观察并初步鉴定,结合分子方法鉴定种类。利用VISTAR软件在显微镜下测量凤鲚体长,每月随机取30尾用于测量,不足30尾的月份全部测量。参照Kendal等^[14]的方法随机取出各体长范围仔稚鱼进行发育分期,划分为5个阶段:卵黄囊期(yolk-sac stage),卵黄囊存在;前弯曲期(preflexion stage),卵黄囊彻底消失,脊索末端未向上弯曲;弯曲期(flexion stage),脊索末端向上弯曲,但尾下骨后缘未出现与体轴垂直的情况;后弯曲期(postflexion stage),此时尾下骨后缘与体轴垂直;稚鱼期(juvenile stage),鳍条均已经形成完全且出现鳞片。

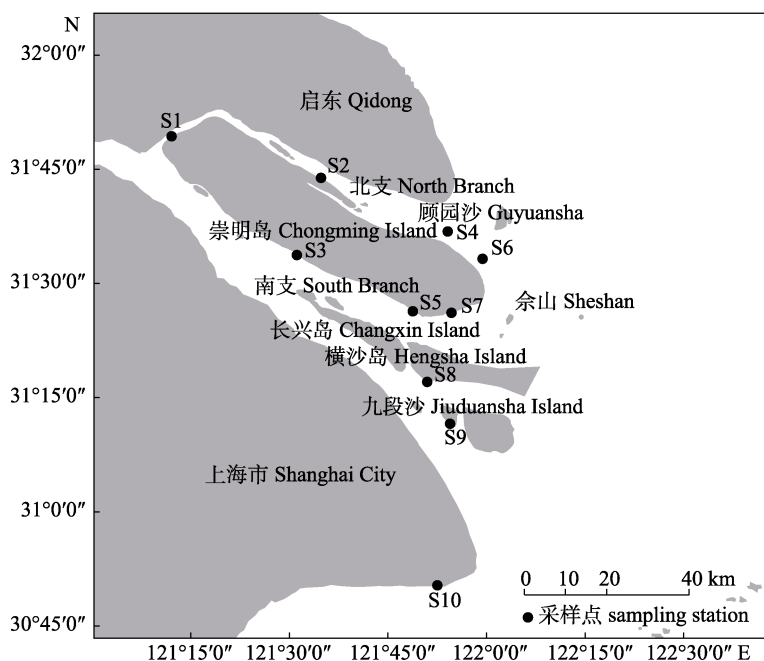


图1 长江口凤鲚仔稚鱼采样位点

Fig. 1 Sampling stations of *Coilia mystus* larvae and juveniles in the Yangtze Estuary

1.2.2 丰度计算 仔稚鱼丰度计算公式如下所示:

$$D = \frac{N}{(0.3 \times Q) \times \pi R^2}$$

式中, N 为该位点凤鲚仔稚鱼捕捞尾数, Q 为浮游

生物网的流量, R 为浮游生物网口的半径, D 为凤鲚仔稚鱼丰度。

1.2.3 GAM模型的构建 本研究结合以往研究结果^[15-16], 选取与仔稚鱼分布密切相关的环境因

子(温度、盐度、溶解氧、浊度、水深)进行分析。温度、盐度利用多参数水质分析仪(YSI Pro plus)进行现场测定,水深利用 ADCP 测量,浊度利用浊度检测计(WGZ-1 型)测定。以凤鲚仔稚鱼丰度作为响应变量,基于 GAM 模型与筛选的环境因子进行分析, GAM 模型的表达式如下:

$$\log(A+0.01) = \varepsilon + s(x_1) + s(x_2) + \cdots + s(x_p)$$

式中, A 为凤鲚仔稚鱼丰度, 与环境变量连接函数为 $\log$, $x_1, \cdots, x_p$ 为 p 个所选环境变量, ε 是回归方程常数项; s 为自然样条平滑函数(spline smoothing), 平滑函数一般可用 3 次样条函数来估计^[17]。为解决零值出现的问题, 将丰度加 0.01, 再对数据进行对数处理。模型构建均在 R3.5.2 中利用 mgcv 软件包完成, 模型选择采用 AIC 值, AIC 值最低为最优模型^[18]。

AIC 由以下公式计算:

$$AIC = 2k - 2\ln L$$

式中, k 是参数的个数, L 是似然函数。

本研究数据整理计算使用 Excel 2016, 图表绘制利用 Arcgis 10.5 和 R 3.5.2 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同月份凤鲚体长分布频率及发育分期

本研究共采集到凤鲚仔稚鱼 6133 尾, 随机测量 161 尾, 体长范围为 2.79~29.90 mm, 得出体长

频率分布如图 2 所示。5 月凤鲚体长主要分布在 6~9 mm, 占总体数量的 46.7%, 未出现体长大于 15 mm 的个体。根据不同月发育期组成(图 3)可以看出, 5 月大部分处于卵黄囊期(50.0%), 前弯曲和弯曲期个体相对较少, 分别占比 23.3%和 26.7%, 未出现后弯曲期和稚鱼期个体。可见, 5 月大部分个体相对较小。6 月凤鲚体长分布频率最高范围从 5 月的 6~9 mm 升高到 9~12 mm, 占总体数量的 30.0%, 凤鲚个体开始变大, 出现了后弯曲期个体, 但相对较少(13.3%)。此外, 6 月以弯曲期仔鱼占比最多, 为 56.7%。7 月凤鲚体长分布范围较广, 体长最小和最大个体均有分布, 其中后弯曲期占比最高, 为 36.7%, 并出现了稚鱼期个体, 占比 16.7%。8 月凤鲚体长主要分布在 3~15 mm 之间, 频率最高的分布在 9~12 mm (36.7%), 发育期主要处于前弯曲期和弯曲期。8 月存在卵黄囊期仔鱼, 但未出现稚鱼期个体。9 月主要为 9~12 mm 和 12~15 mm 个体(86.7%), 为弯曲期仔鱼。10 月主要为 9~12 mm 个体, 另外也出现了 21~27 mm 相对较大的个体, 不同发育期的个体均有出现。

根据不同月份凤鲚仔稚鱼体长分布和发育期组成可见, 5—8 月均存在个体较小的卵黄囊期仔鱼, 并且调查发现这 4 个月凤鲚出现的数量也相对较多, 可见, 5—8 月为长江口凤鲚的繁殖盛期。

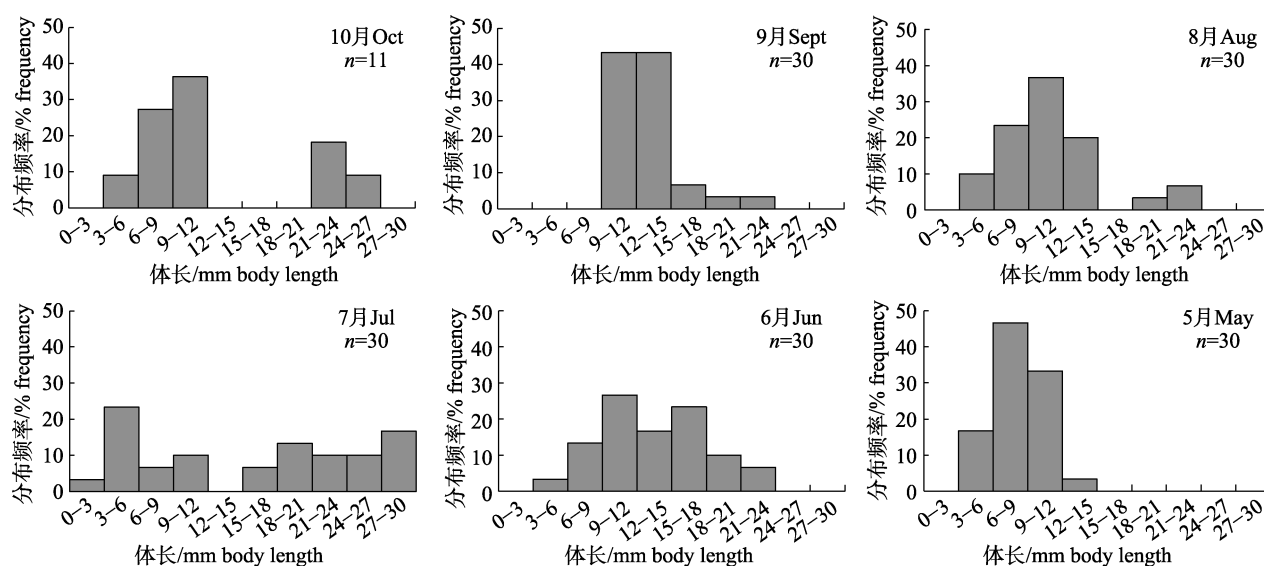


图 2 5—10 月长江口凤鲚仔稚鱼体长分布频率图

Fig. 2 Distribution frequency of body length of *Coilia mystus* larvae and juveniles from May to October in the Yangtze Estuary

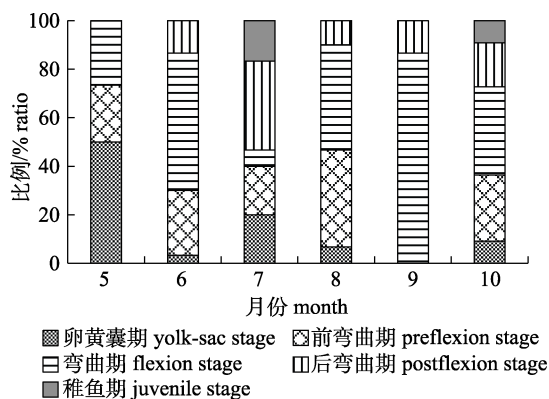


图3 不同月份长江口凤鲚仔稚鱼发育阶段组成

Fig. 3 Composition of development stages of *Coilia mystus* larvae and juveniles in different months in the Yangtze Estuary

2.2 长江口凤鲚仔稚鱼时空分布特征

从凤鲚仔稚鱼丰度分布情况(图4)可以看出, 长江口北支口门水域的S4和S6位点凤鲚仔稚鱼总丰度最高, 其中位点S4总丰度为 9.17 ind/m^3 , 位点S6总丰度为 28.28 ind/m^3 。

5月凤鲚主要分布在S6、S4、S7位点, 其中S6的丰度最高, 为 3.23 ind/m^3 , 可见, 5月凤鲚仔稚鱼主要分布在北支口门水域。6月各位点均采集到凤鲚仔稚鱼, 以北支S6位点的丰度最高(23.94 ind/m^3), 与5月相同, 凤鲚仔稚鱼主要分布在北支口门水域。7月以北支口内位点S2的丰度最高, 为 1.08 ind/m^3 , 大部分样本仍分布在北支水域。8月主要分布在北支的S6位点, 其丰度为 0.68 ind/m^3 。9月丰度最高的为北支的S4位点(0.16 ind/m^3), 其丰度仅为8月最高丰度的24%。10月最高丰度出现在S5位点(0.031 ind/m^3), 其值仅为6月最高丰度的0.13%。

从不同月份丰度的空间分布来看, 5—9月凤鲚仔稚鱼主要分布于长江口北支水域, 5月和6月集中分布在北支口门水域, 7月随着凤鲚个体的生长, 一部分个体离开口门水域向近海洄游, 一部分移向口内, 其中有71%的后弯曲期和稚鱼期凤鲚分布于启隆乡(S2沿岸水域)。8月和9月凤鲚仔稚鱼分布分别与5月和6月类似, 在北支口门水域出现了新的早期阶段仔鱼。而10月凤鲚仔稚鱼丰度最小, 主要分布在南支S5位点。

2.3 长江口凤鲚仔稚鱼分布与环境因子的关系

2.3.1 最优模型的筛选

本研究利用环境因子温

度、盐度、溶解氧、浊度、水深与凤鲚仔稚鱼丰度拟合进行最佳模型筛选(表1), 基于AIC值最低为最优模型的原则, 添加环境因子直至AIC值不再减小。GAM模型分析得出最优模型为: $\log(4+0.01)=\varepsilon+s(\text{Sal})+s(\text{DO})+s(T)$, AIC值为95.89, 累积偏差解释率65.50%。盐度、温度和溶解氧对凤鲚丰度的影响显著($P<0.05$)。

2.3.2 环境因子对凤鲚仔稚鱼丰度的影响

环境因子对凤鲚仔稚鱼丰度的影响如图5所示。从图5a盐度对丰度的影响可以看出, 凤鲚仔稚鱼丰度随盐度的增加, 呈先增加后减少的趋势。盐度小于7.5时, 丰度随盐度增高而增加; 盐度在7.5左右时, 凤鲚仔稚鱼的丰度达到峰值。结果表明, 凤鲚仔稚鱼的最适盐度在5~12。温度对凤鲚仔稚鱼丰度的影响(图5b)表现为, 随着温度的增大, 丰度呈现先减少后平缓波动的变化趋势。温度在20~22℃时, 丰度随着温度的增高而降低; 当温度升高至22~30℃时, 丰度随温度增高波动变化, 总体趋于平稳。

从溶解氧对凤鲚仔稚鱼丰度的影响(图5c)来看, 溶解氧在约5.2 mg/L时, 丰度最高, 溶解氧达到6 mg/L后, 凤鲚仔稚鱼丰度无明显变化趋势, 可见, 凤鲚仔稚鱼的适宜溶解氧在5.2~8.0 mg/L。

3 讨论

3.1 长江口凤鲚仔稚鱼丰度变化及主要繁殖期

鱼类早期资源的存活率受外界影响较大, 仔稚鱼存活数量的多少直接影响着补充群体资源量^[19]。本研究发现, 长江口不同月份凤鲚仔稚鱼丰度差别明显, 6月凤鲚仔稚鱼的丰度最高, 为 33.94 ind/m^3 ; 5月丰度次之(4.18 ind/m^3), 9月和10月丰度较小。5月以卵黄囊期仔鱼为主, 且丰度较高。此外, 5月还分布有26.7%的弯曲期仔鱼, 根据王焕^[10]的研究结果, 推算出弯曲期仔鱼产于4月下旬, 故4月凤鲚已开始产卵, 5月进入主要繁殖期。6月有大量早期发育阶段仔鱼, 且丰度最高。本研究结果验证了以往研究5—6月为凤鲚产卵盛期的结论^[1-2]。7月和8月凤鲚体长分布范围主要为3~15 mm, 个体较小, 较多的是卵黄囊期

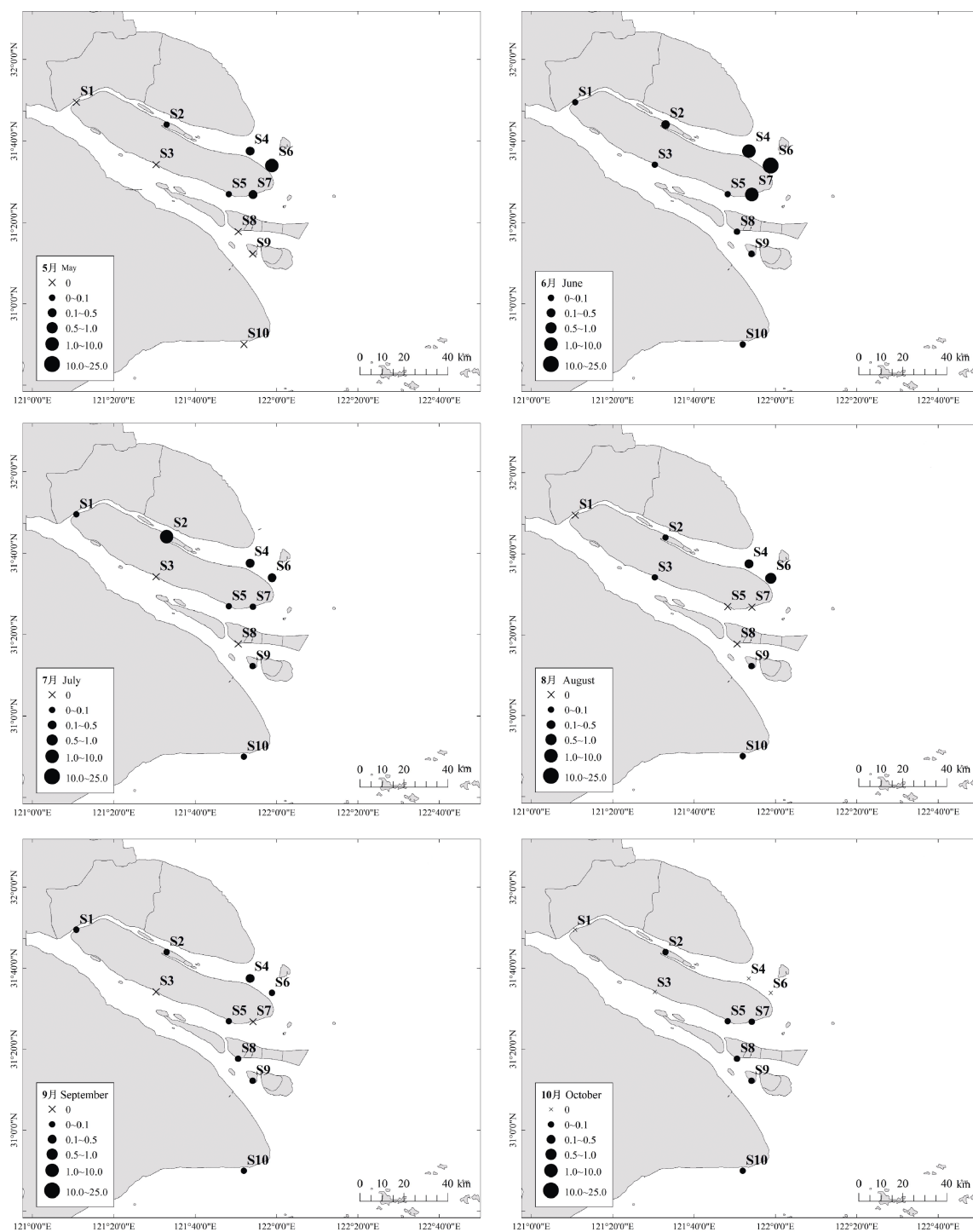


图 4 5—10 月长江口凤鲚仔稚鱼丰度分布图

Fig. 4 Density distribution of *Coilia mystus* larvae and juveniles from May to October in the Yangtze Estuary

和前弯曲期仔鱼, 而 9 月未出现卵黄囊期仔鱼, 依据采样时间推算, 9 月占比较大的弯曲期仔鱼主要产于 8 月, 故 7 月和 8 月也为凤鲚繁殖盛期。在调查中发现, 10 月仍采集到了处于卵黄囊期的 3~6 mm 的风鲚仔鱼, 这表明 4—10 月长江口水域

均有凤鲚繁殖群体存在。与以往的研究中凤鲚繁殖期在 4—9 月相比^[9], 繁殖期有所延长。蒋玫等^[20]、郑惠东^[21]研究表明, 水温对繁殖鱼类的性腺发育进程影响较大, 是影响鱼类繁殖和胚胎发育的重要环境因子。本研究调查期间 10 月长江口

表 1 基于 AIC 选择最优 GAM 模型的过程
Tab. 1 Process of selecting optimal GAM model based on AIC

模型 model	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>R</i> -sq.(adj)	偏差解释率/% deviance explained	AIC
$\log(A+0.01) = \varepsilon + s(T)$	0.45	0.50	-0.01	0.77	131.64
$\log(A+0.01) = \varepsilon + s(\text{Dep})$	0.10	0.75	-0.02	0.18	132.00
$\log(A+0.01) = \varepsilon + s(\text{Tur})$	0.86	0.44	-0.01	0.53	130.85
$\log(A+0.01) = \varepsilon + s(\text{Sal})$	3.01	0.01	0.26	31.90	118.22
$\log(A+0.01) = \varepsilon + s(\text{DO})$	1.70	0.20	0.14	23.00	116.78
$\log(A+0.01) = \varepsilon + s(\text{Sal}) + s(T)$	—	—	0.30	42.00	117.89
$\log(A+0.01) = \varepsilon + s(\text{Sal}) + s(\text{Dep})$	—	—	0.24	33.20	120.00
$\log(A+0.01) = \varepsilon + s(\text{Sal}) + s(\text{Tur})$	—	—	0.26	35.60	118.49
$\log(A+0.01) = \varepsilon + s(\text{Sal}) + s(\text{DO})$	—	—	0.22	34.80	112.51
$\log(A+0.01) = \varepsilon + s(\text{Sal}) + s(\text{DO}) + s(T)$	—	—	0.50	65.50	95.89
$\log(A+0.01) = \varepsilon + s(\text{Sal}) + s(\text{DO}) + s(\text{Dep})$	—	—	0.22	34.40	114.29
$\log(A+0.01) = \varepsilon + s(\text{Sal}) + s(\text{DO}) + s(\text{Tur})$	—	—	0.30	42.50	108.86

注: *T* 表示温度; Dep 表示水深; Tur 表示浊度; Sal 表示盐度; DO 表示溶解氧。
Note: *T* is temperature; Dep is water depth; Tur is turbidity; Sal is salinity; DO is dissolved oxygen.

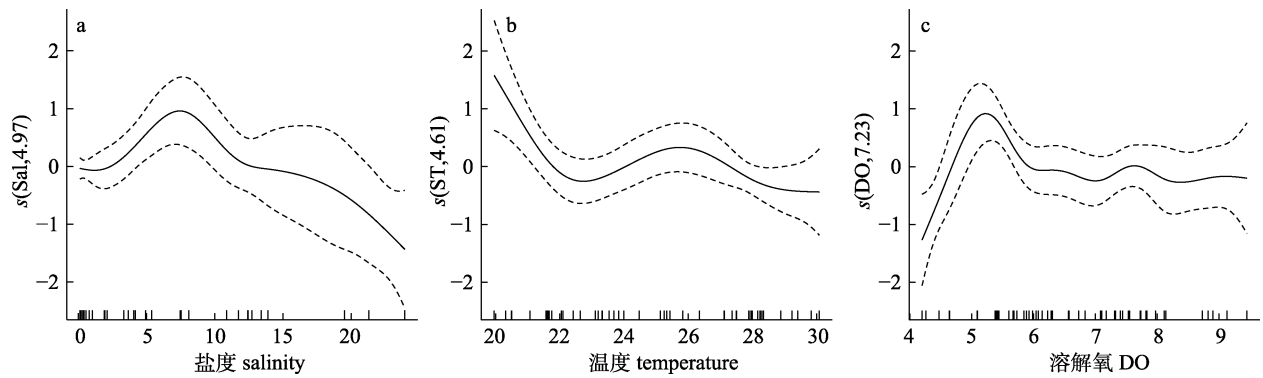


图 5 盐度(a)、温度(b)和溶解氧(c)对长江口凤鲚仔稚鱼丰度的影响
Fig. 5 Effects of salinity (a), temperature (b) and dissolved oxygen (c) on the density of *Coilia mystus* larvae and juveniles in the Yangtze Estuary

平均水温为 22.5 ℃, 而凤鲚产卵所适宜水温范围为 18~28 ℃^[2], 故推测 10 月也适宜凤鲚的产卵繁殖。

3.2 长江口凤鲚仔稚鱼的时空分布特征

从本研究凤鲚仔稚鱼丰度的时空变化可知, 丰度较高的 5 月和 6 月凤鲚仔稚鱼主要分布在长江口北支口门处水域(S4 和 S6), 而 7 月分布水域移至北支的 S2 位点, 其中 71% 的后弯曲期和稚鱼期仔鱼在此分布。已有研究发现, 南水北调工程、三峡蓄水后长江径流发生改变引起长江口咸淡水锋面内移^[22-24], 凤鲚仔稚鱼的索饵场可能受盐度

条件的改变而向口内移动。因此, S2 位点的仔稚鱼可能来自北支口门水域逐渐长大的个体。此外, 8 月和 9 月的早期仔鱼分布与 5 月和 6 月类似, 分布在北支口门水域(S4 和 S6), 主要为 8 月新产的仔鱼。根据以往研究, 渔汛末期凤鲚繁殖群体洄游到长兴岛、横沙附近^[3], 故 10 月在南支出现的凤鲚仔鱼可能为凤鲚亲体途经此处所产个体。凤鲚产卵季节盐度一般在 4~24^[1], 10 月长江处于平水期, 随着长江径流的减弱, 南支的平均盐度升至 3.4, 更适于凤鲚早期个体的生长。本研究中, 有 5 个月时间凤鲚仔稚鱼都主要分布在长江口北

支水域,与蒋玫等^[25]研究中 5 月凤鲚仔鱼主要分布在北支口门水域的结论一致。因此,长江口北支的东旺沙-北八淤-启隆乡沿岸水域可能为凤鲚的重要育幼场。凤鲚作为洄游性鱼类,具有广盐性特征。在全球气候变暖的大背景下,Zhang 等^[26]的研究预测在环境压力的作用下凤鲚仔稚鱼的分布范围有可能在未来会扩大,发生北移和向长江口内移动的情况。因此,结合本研究结果,可将北支水域作为凤鲚早期资源保护的重点区域。

鱼类早期个体的发育阶段不同,其行为也会发生变化,因此不同发育阶段的行为变化在决定近岸水域鱼类仔鱼丰度方面也起着重要作用^[27]。在近年来的研究中发现,北支河势改变,盐水倒灌现象频繁发生^[28-29],而凤鲚卵为浮性卵且仔稚鱼游泳能力弱,水流作用对其分布影响较大,凤鲚仔稚鱼也可能随着潮水作用从邻近水域带入北支沿岸水域。因此,通过本研究主要确定凤鲚仔稚鱼主要育幼场分布,而对于凤鲚的产卵场位置还有待进一步的研究证实。

3.3 环境因子对凤鲚仔稚鱼丰度的影响

鱼类早期群体的时空分布变化往往与环境条件和生物动态变化有关^[30]。为研究凤鲚仔稚鱼丰度与环境因子的相关性,本研究引入 GAM 模型进行分析。拟合后模型结果表明长江口凤鲚仔稚鱼的分布主要受盐度、温度和溶解氧的影响,3 个环境因子均对丰度的影响显著($P < 0.05$)。盐度和温度作为影响鱼类生理活动的重要环境因素,在以往的研究中证明其对鱼类的分布特征具有明显影响^[31-32]。在陈渊戈等^[33]的相关研究中也表明盐度和温度与仔稚鱼分布显著相关。本研究发现,盐度作为影响鱼类早期资源的重要环境因子之一,主要影响着早期资源的空间分布^[34],在长蛇鲻(*Slender lizardfish*)^[35]的研究中也发现幼体分布与盐度显著相关。本研究结果表明凤鲚仔稚鱼适宜的盐度在 5~12,该盐度范围与凤鲚仔稚鱼主要分布的北支水域一致。模型拟合结果显示,凤鲚仔稚鱼适应低盐环境,当盐度升高后,丰度值变低,盐度达到 15 以后,盐度对凤鲚仔稚鱼丰度开始产生负效应。本研究中,10 月凤鲚仔稚鱼主要分布在南支,这主要是由于北支的盐度逐渐升高(平均

盐度 20.1)已不适合凤鲚仔稚鱼分布,而南支的平均盐度升至 3.4,更接近凤鲚仔稚鱼的适宜盐度。盐度在 7.5 左右时,丰度最高,这与调查中北支口门水域凤鲚仔稚鱼丰度分布最高的结论一致。凤鲚仔稚鱼的适宜盐度较低,可能是因为盐度主要调节鱼类的体液平衡,低盐环境更接近鱼体液的渗透压,更利于凤鲚早期个体的生长发育^[36-37]。温度在 20 °C 和 26 °C 左右时,凤鲚仔稚鱼丰度较高,温度在 20~28 °C 时相对适宜凤鲚仔稚鱼生长。调查发现凤鲚仔稚鱼丰度在 5 月(平均温度 21.4 °C)和 6 月(平均温度 24.9 °C)最高,与模型拟合结果一致。该结果与蓝点马鲛(*Scomberomorus niphonius*)^[38]情况相似,在温度适宜的春季开始大量产卵繁殖,分布数量最多。从图 5b 也可以看出,温度在 22 °C 和 30 °C 左右时,丰度相对较低,分别对应着 10 月的低温(平均 22.6 °C)和 8 月的高温(平均 29.7 °C),这是由于 10 月后随着温度的降低,凤鲚的繁殖期趋于结束,仔稚鱼分布较少,而 8 月底温度相对较高,已不适合凤鲚大量产卵繁殖,其繁殖盛期趋于结束,仔稚鱼数量开始降低。此外,本研究发现溶解氧对凤鲚丰度的影响也很明显,这与王九江等^[39]的研究结果相似,溶解氧与仔稚鱼分布关系密切。研究结果表明凤鲚仔稚鱼的适宜溶解氧在 5.2~8.0 mg/L,模型分析显示溶解氧在 5.2 mg/L 左右时,丰度达到最大值,这与实际调查结果相符,6 月丰度最高的 S6 位点,溶解氧 5.4 mg/L。结合模型拟合曲线和凤鲚仔稚鱼集中分布区的溶解氧分布情况可见,溶解氧在 5.2~8.0 mg/L 均适合凤鲚仔稚鱼生长。本研究主要分析了环境理化因素与凤鲚仔稚鱼分布的相关性,在以后的研究也可以加入地理因素和水文动力学因素等进一步分析,以期得到更为全面的结果。

参考文献:

- [1] Zhuang P, Wang Y H, Li S F, et al. Fishes of the Yangtze Estuary[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2006: 157-160. [庄平, 王幼槐, 李圣法, 等. 长江口鱼类[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2006: 157-160.]
- [2] Zhao F, Yang Q, Song C, et al. Biological characteristics and resource utilization of *Coilia mystus* in the Yangtze Estu-

- ary[J]. Marine Fisheries, 2020, 42(1): 110-119. [赵峰, 杨琴, 宋超, 等. 长江口凤鲚生物学特征及其资源利用研究进展[J]. 海洋渔业, 2020, 42(1): 110-119.]
- [3] Liu K, Zhang M Y, Xu D P, et al. Studies on resource change and MSY of *Coilia mystus* in the Yangtze River Estuary[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2004, 13(4): 298-303. [刘凯, 张敏莹, 徐东坡, 等. 长江口凤鲚资源变动及最大持续产量研究[J]. 上海水产大学学报, 2004, 13(4): 298-303.]
- [4] Ni J F, Guo H Y, Tang W Q, et al. On interannual variations of *Coilia mystus* catches in the Yangtze River Estuary[J]. Marine Fisheries, 2020, 42(2): 192-204. [倪健夫, 郭弘艺, 唐文乔, 等. 长江口汛期凤鲚捕捞量年际变化研究[J]. 海洋渔业, 2020, 42(2): 192-204.]
- [5] Zhang R Z, Lu S F, Zhao C Y, et al. Fish Eggs and Larvae of Chinese Offshore[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1985: 28-29. [张仁斋, 陆穗芬, 赵传纲, 等. 中国近海鱼卵与仔鱼[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 28-29.]
- [6] Wang J H, Sun Y W, Liu C C, et al. The ichthyoplankton resource investigation in Changjiang Estuary[J]. Journal of Marine Sciences, 2007, 25(4): 40-50. [王金辉, 孙亚伟, 刘材材, 等. 长江口鱼卵仔鱼资源现状的调查与分析[J]. 海洋学研究, 2007, 25(4): 40-50.]
- [7] Zhou Y D, Jin H W, Zhang H L, et al. Distributions of ichthyoplankton of *Coilia mystus* in the Coast of north Zhejiang Province in spring and summer[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2011, 30(4): 307-312. [周永东, 金海卫, 张洪亮, 等. 浙江北部沿岸春夏季凤鲚鱼卵及仔、稚鱼分布特征[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2011, 30(4): 307-312.]
- [8] East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai Fisheries Research Institute. The Fishes of Shanghai Area[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1990. [中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海市水产研究所. 上海鱼类志[M]. 上海: 上海科学与技术出版社, 1990.]
- [9] Ni Y, Wang Y L, Jiang M, et al. Biological characteristics of *Coilia mystus* in the Changjiang estuary[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1999, 6(5): 69-71. [倪勇, 王云龙, 蒋玫, 等. 长江口凤鲚的渔业生物学特性[J]. 中国水产科学, 1999, 6(5): 69-71.]
- [10] Wang H H. The study on growth and development of *Coilia mystus* in the Yangtze estuary based on otolith microstructure[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. [王焕焕. 基于耳石微结构的长江口凤鲚生长发育特性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.]
- [11] Sun X, Zhang Y L, Liu X X, et al. Evaluation of the prediction effect of two GAMs on the distribution of *Cynoglossus joyneri* in the Haizhou Bay[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(6): 20-28. [孙霄, 张云雷, 刘笑笑, 等. 两种 GAM 模型对海州湾短吻红舌鲷(*Cynoglossus joyneri*)资源分布预测效果的比较研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(6): 20-28.]
- [12] Yang S L, Fan X M, Wu Y M, et al. The relationship between the fishing ground of mackerel (*Scomber australasicus*) in Arabian Sea and the environment based on GAM model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(8): 2466-2470. [杨胜龙, 范秀梅, 伍玉梅, 等. 基于 GAM 模型的阿拉伯海鲈鱼渔场分布与环境关系[J]. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2466-2470.]
- [13] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: Specifications for oceanographic survey—Part 6: Marine biological survey, GB/T 12763.6-2007[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. 中华人民共和国推荐性国家标准: 海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查 GB/T 12763.6-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.]
- [14] Kendall A W Jr, Ahlstrom E H, Moser H G. Early life history stages of fishes and their characters[M]//Ontogeny and Systematics of Fishes. Lawrence: Allen Press, 1984: 11-22.
- [15] Ma J, Huang J L, Chen J H, et al. Analysis of spatiotemporal fish density distribution and its influential factors based on generalized additive model (GAM) in the Yangtze River estuary[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(6): 936-946. [马金, 黄金玲, 陈锦辉, 等. 基于 GAM 的长江口鱼类资源时空分布及影响因素[J]. 水产学报, 2020, 44(6): 936-946.]
- [16] Tian J L, Dai P, Ren P, et al. Assemblage of larvae and juvenile fish in Anqing Xinzhou section of the Yangtze River[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(8): 916-926. [田佳丽, 代培, 任鹏, 等. 长江安庆新洲江段仔稚鱼的群聚特征[J]. 中国水产科学, 2020, 27(8): 916-926.]
- [17] Hastie T, Tibshirani R. Generalized Additive Models[M]. London and New York: Chapman and Hall, 1990.
- [18] Chambers J M, Hastie T J. Statistical Models in S[M]. New York: Chapman & Hall, 1992.
- [19] 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.]
- [20] Jiang M, Shen X Q, Chen Y Q. Distribution of larvae fish and its relationships with water environmental factors in offshore area of Fengxian[J]. Chinese Journal of Ecology,

- 2008, 27(1): 73-76. [蒋玫, 沈新强, 陈渊泉. 奉贤近海仔鱼的分布及其与水环境的关系[J]. 生态学杂志, 2008, 27(1): 73-76.]
- [21] 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.]
- [22] Dong F Y. A preliminary prediction on the effects of the eastern route of water transferring project from Yangtze River on fisheries resources in Yangtze River estuary[J]. Resources and Environment in the Yangtze Valley, 1997, 6(2): 168-172. [董方勇. 南水北调东线工程对长江口渔业资源的影响[J]. 长江流域资源与环境, 1997, 6(2): 168-172.]
- [23] Duan X B, Chen D Q, Li Z H, et al. Current status of spawning grounds of fishes with pelagic eggs in the middle reaches of the Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15(4): 523-532. [段辛斌, 陈大庆, 李志华, 等. 三峡水库蓄水后长江中游产漂流性卵鱼类产卵场现状[J]. 中国水产科学, 2008, 15(4): 523-532.]
- [24] Liu S D, Xian W W. Ichthyoplankton community structure characteristics during spring in Yangtze River estuary before and after impoundment of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(10): 82-87. [刘淑德, 钱薇薇. 三峡水库蓄水前后春季长江口鱼类浮游生物群落结构特征[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(10): 82-87.]
- [25] Jiang M, Wang Y L, Shen X Q, et al. Distribution characteristics of fish eggs and larvae in *Acipenser sinensis* Natural Reserve at Changjiang River Estuary[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(2): 288-292. [蒋玫, 王云龙, 沈新强, 等. 长江口中华鲟保护区鱼卵和仔鱼的分布特征[J]. 生态学杂志, 2009, 28(2): 288-292.]
- [26] Zhang Z X, Mammola S, Xian W W, et al. Modelling the potential impacts of climate change on the distribution of ichthyoplankton in the Yangtze Estuary, China[J]. Diversity and Distributions, 2020, 26(1): 126-137.
- [27] Tzeng W N, Wang Y T. Hydrography and distribution dynamics of larval and juvenile fishes in the coastal waters of the Tanshui River estuary, Taiwan, with reference to estuarine larval transport[J]. Marine Biology, 1993, 116(2): 205-217.
- [28] Wu F R, Tong C F. Evolution of the North Branch of Yangtze Estuary in last 30 years and corresponding effects on species diversity[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(2): 72-85. [吴逢润, 童春富. 近 30 年长江口北支演变及其对物种多样性的影响[J]. 海洋学报, 2017, 39(2): 72-85.]
- [29] Yin X L, Xu Z L. Similarity analysis of zooplankton assemblages among different zones in the Yangtze River estuary[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): 5621-5631. [殷晓龙, 徐兆礼. 长江口南支、北支、北港及口外水域浮游动物群聚相似性[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5621-5631.]
- [30] Harris S A, Cyrus D P, Beckley L E. The larval fish assemblage in nearshore coastal waters off the St Lucia estuary, South Africa[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, 49(6): 789-811.
- [31] Fan Z W, Jiang R J, Li Z, et al. Community structure of ichthyoplankton and its relationship with environmental factors in Zhongjieshan Islands, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4392-4403. [樊紫薇, 蒋日进, 李哲, 等. 中街山列岛海域鱼卵、仔稚鱼群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4392-4403.]
- [32] Li J S, Hu F, Cheng J H. Distributions of fish eggs and juveniles and relations between surface layer water temperature and salinity of the Yangtze estuary water area in spring[J]. Marine Sciences, 2007, 31(4): 16-21. [李建生, 胡芬, 程家骅. 长江口水域春季鱼卵仔鱼分布及其与温度盐度的关系[J]. 海洋科学, 2007, 31(4): 16-21.]
- [33] Chen Y G, Mao C Z, Lin N, et al. Influence of abiotic factors on spatiotemporal patterns of larval fish assemblages in the surf zones of the Yangtze River estuary and Hangzhou Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(4): 780-790. [陈渊戈, 毛成责, 林楠, 等. 长江口和杭州湾碎波带仔稚鱼群聚时空分布特征及相关环境因子分析[J]. 中国水产科学, 2015, 22(4): 780-790.]
- [34] Zhang Y Q. Environmental impact on the fish assemblage structure in adjacent sea area of the Yangtze River estuary[D]. Qingdao: Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, 2012. [张迎秋. 长江口近海鱼类群落环境影响分析[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2012.]
- [35] Liu Y W, Zhang C L, Zan X X, et al. Distribution of relative abundance of slender lizardfish and its influencing factors in southern coastal waters of Shandong during autumn[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(4): 45-53. [刘逸文, 张崇良, 咎肖肖, 等. 山东南部近海秋季长蛇鲻相对资源量的分布及其影响因素[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(4): 45-53.]
- [36] Hickman C P Jr. Urine composition and kidney tubular function in southern flounder, *Paralichthys lethostigma*, in sea water[J]. Canadian Journal of Zoology, 1968, 46(3): 439-455.
- [37] Tytler P, Blaxter J H. The effects of external salinity on the drinking rates of the larvae of herring, plaice and cod[J].

- Journal of Experimental Biology, 1988, 138(1): 1-15.
- [38] Song C, Wang Y T, Liu Z L, et al. Relationship between environmental factors and distribution of *Scomberomorus niphonius* eggs, larvae, and juveniles in Xiangshan Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(5): 1197-1204. [宋超, 王宇坛, 刘尊雷, 等. 象山港蓝点马鲛鱼卵、仔稚鱼的时空分布特征及其与环境因子关系[J]. 中国水产科学, 2016, 23(5): 1197-1204.]
- [39] Wang J J, Liu Y, Xiao Y Y, et al. Population characteristics of fish eggs and larvae and their relationship with environmental factors in Daya Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(1): 14-25. [王九江, 刘永, 肖雅元, 等. 大亚湾鱼卵、仔稚鱼种群特征与环境因子的相关关系[J]. 中国水产科学, 2019, 26(1): 14-25.]

Temporal and spatial distribution of *Coilia mystus* larvae and juveniles in the Yangtze Estuary during primary breeding season

HU Lijuan^{1,2}, SONG Chao^{2,3,4}, GENG Zhi^{2,3,4}, ZHAO Feng^{1,2,3,4}, JIANG Jun^{1,2}, LIU Ruohui^{1,2}, ZHUANG Ping^{1,2,3,4}

1. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment of the East China Sea and Yangtze Estuary, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;
3. Shanghai Engineering Research Center of Fisheries Resources Enhancement and Ecological Restoration of the Yangtze Estuary, Shanghai 200090, China;
4. Key Laboratory of Fisheries Ecology of the Yangtze Estuary, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

Abstract: *Coilia mystus* is an important economic fish in the Yangtze Estuary. Due to overfishing, spawning, and baiting habitat distribution, *C. mystus* fisheries resources in the Yangtze Estuary are declining. The early development stage of fish is sensitive to environmental effects, and the number of larvae and juveniles directly affects the amount of supplementary population resources. In order to better protect the resources of *C. mystus*, it is necessary to study its early life cycle. In this study, 10 survey stations were set up in the Yangtze Estuary to collect larvae and juveniles of *C. mystus* and assess environmental factors between May and October 2019. The reproductive time and early individual distributions of *C. mystus* in the Yangtze Estuary were studied by statistical analysis of body length, development period, and density of collected samples. The results showed that the primary breeding period of *C. mystus* was from May to October, with the most abundant activity between May and August. The larvae and juveniles of *C. mystus* were mainly distributed in the coastal waters of Dongwangsha (S6), Beibayao (S4) and Qilongxiang (S2), which are important nursing grounds for *C. mystus* in the Yangtze Estuary. In addition, we introduced the generalized additive model (GAM) to analyze the correlation between the abundance of larvae and juveniles of *C. mystus* and other environment factors. The results of GAM analysis showed that the distribution of *C. mystus* larvae and juveniles was mainly affected by salinity, temperature, and dissolved oxygen. All three environmental factors had significant effects on the abundance of *C. mystus* larvae and juveniles ($P < 0.05$), and the interpretation rate of the GAM optimal model was 65.50%. The results showed that the optimum salinity was about 5–12, the optimal temperature was 20–28 °C, and the optimal dissolved oxygen was approximately 5.2–8.0 mg/L.

Key words: *Coilia mystus*; larvae and juveniles; temporal and spatial distribution; generalized additive models; Yangtze Estuary

Corresponding author: ZHAO Feng. E-mail: zhaof@ecsf.ac.cn