

文章编号: 1674-5566(2025)06-1292-16

DOI: 10.12024/jsou.20241204745

长江口鲚属鱼类鱼卵、仔稚鱼的分布与环境因子的关系

赵度宾^{1,2}, 陆天宇¹, 陈锦辉³, 魏广恩³, 刘企昂¹, 王晓东¹, 钟俊生¹, 林 军⁴

(1. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306; 2. 生态环境部太湖流域东海海域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 上海 200125; 3. 上海市水生野生动植物保护研究中心, 上海 200092; 4. 上海海洋大学 海洋牧场工程技术研究中心, 上海 201306)

摘 要: 基于2022年7月—2023年5月在长江口南支、北支及崇明岛东滩水域设置30个采样点,按季度使用大型仔稚鱼网(网口直径1.3 m,网目0.5 mm)进行表层水平拖网采集刀鲚(*Coilia nasus*)、凤鲚(*Coilia mystus*)仔稚鱼,同时测定环境因子,利用广义相加模型(GAM)分析影响其时空分布的环境因子。结果表明:刀鲚仔稚鱼主要分布于长江口南支、北支口门内和崇明岛东滩附近水域,未采集到刀鲚鱼卵;凤鲚鱼卵分布于南支的长兴岛至九段沙水域和北支口门外水域,仔稚鱼主要分布在南支口门外、北支和崇明岛东滩水域。据GAM模型分析,两种鱼类利用长江口作为产卵场、保育场且具有显著的季节性分布:夏季对刀鲚仔稚鱼的丰度有显著的正效应,夏季、春季对凤鲚仔稚鱼的丰度有显著的正效应,夏季显著高于春季($P<0.01$)。盐度对刀鲚仔稚鱼的丰度影响显著($P<0.01$),刀鲚仔稚鱼的适宜盐度为0~6;温度、盐度、pH对凤鲚仔稚鱼的丰度影响显著($P<0.01$),适宜温度为20~32℃,适宜盐度为2~16,适宜pH为7.3~8.2,适宜溶解氧为6.0~9.0 mg/L。环境因子的交互效应中,温度-盐度、温度-pH对凤鲚仔稚鱼的丰度有显著影响。两者的保育场存在重叠现象,不同发育阶段的空间分布存在差异。研究结果有助于更好地了解长江口刀鲚、凤鲚的生态动态,并为早期资源保护提供科学依据。

关键词: 刀鲚; 凤鲚; 仔稚鱼; 时空分布; 广义相加模型

中图分类号: S 932.4 **文献标志码:** A

鲚属(*Coilia*)鱼类隶属鲱形目(Clupeiformes)鲱科(Engraulidae),其中刀鲚(*Coilia nasus*)、凤鲚(*Coilia mystus*)是重要的溯河繁殖洄游性经济鱼类^[1],在我国黄渤海、东海和南海均有分布^[2]。刀鲚、凤鲚作为长江口水域的优势种,其丰度变化在一定程度上反映出洄游性鱼类群落结构对环境变化的响应。由于过度捕捞、环境变化等因素,长江口刀鲚、凤鲚资源严重衰退,已经基本不能形成鱼汛^[3-4]。2018年12月农业农村部发布的《农业农村部关于调整长江流域专项捕捞管理制度的通告》规定自2019年2月,全面禁止刀鲚、凤鲚天然资源生产性捕捞,保护和恢复刀鲚、凤鲚资源至关重要^[4]。仔稚鱼阶段是鱼类生命周期中

最为脆弱和死亡率最高的时期,该阶段的成活率直接影响鱼类年际补充量,是引起鱼类种群数量变动和年龄结构变化的主要原因^[5-7]。国内学者对长江口刀鲚、凤鲚的形态发育、生物学、分布特征和耳石形态学、微化学等进行了大量研究^[8-13]。通过对鱼类早期资源的调查,可以推测鱼类的产卵场、保育场、繁殖期和早期生活史阶段个体对生境的偏好^[14]。

非线性回归分析的广义加性模型(Generalized additive model, GAM)是一种分析渔业资源分布与环境因子间关系的方法,同时也广泛应用于探究鱼卵、仔稚鱼分布与环境因子关系^[15-16]。通过分季节建模发现环境因子在不同季

收稿日期: 2024-12-29 修回日期: 2025-06-01

基金项目: 上海市水生野生动植物保护研究中心项目(D-8006-23-0114);上海市科委地方院校能力建设项目(23010502500)

作者简介: 赵度宾(1999—),男,硕士研究生,研究方向为仔稚鱼生态学。E-mail: dubinzhao@163.com

通信作者: 钟俊生, E-mail: jszhong@shou.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>

节对鱼类资源的影响机制不同^[17]。表层水温、表层盐度是影响凤鲚早期群体分布的主要环境因子,仔稚鱼对水温、盐度的适宜度宽于鱼卵^[18]。尽管长江禁捕前后对刀鲚、凤鲚早期资源有一些报道^[19-23],但缺乏两种鱼类早期资源量、分布的同期比较,本研究为了更全面把握长江禁捕后的长江口刀鲚、凤鲚早期资源状况,在南支、北支和崇明岛东滩,更密集设置站位进行周年季度调查,通过对两种鱼类的同期分布差异进行比较,利用广义相加模型分析影响其时空分布的环境因子,旨在分析其早期发育阶段时空分布的差异,为探明长江口刀鲚和凤鲚产卵场、保育场以及早期资源保护提供理论依据。

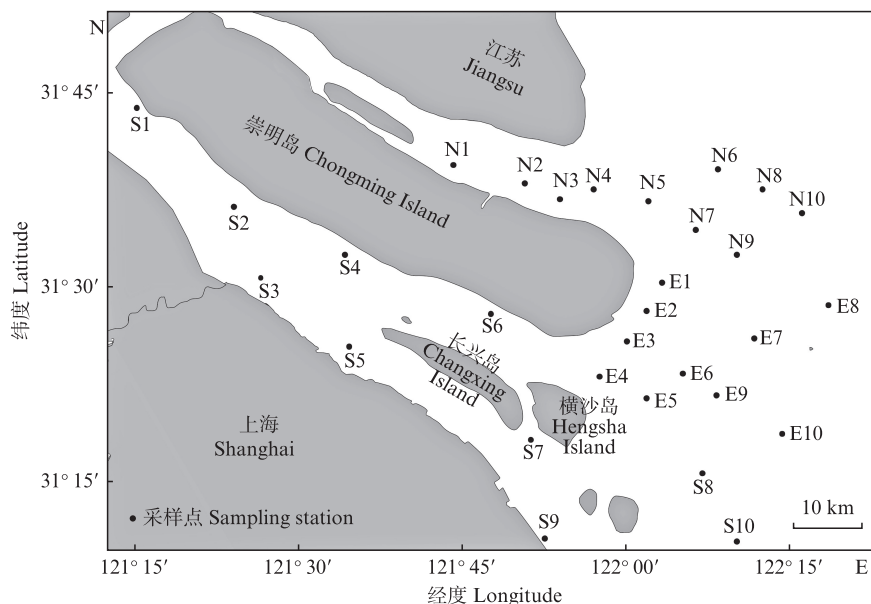
1 材料与方法

1.1 调查方法与种类鉴定

在长江口(31° N-31° 45' N、121° E-122° 15' E)南支(S1-S10)、北支(N1-N10)、崇明岛东滩(E1-E10)周边水域各设置10个站点(图1),渔业资源调查船“沪崇渔 11225”于2022年7月

18日—8月14日(夏季)、10月24日—11月10日(秋季)、2023年2月9日—3月8日(冬季)和4月22日—5月29日(春季),使用大型仔稚鱼网(网口直径1.3 m,网目0.5 mm)进行表层水平拖网调查,每站点拖网时间10 min,航速2 kn。用网口流量计(Hydro-bios, No. 438100, Germany)记录每网流量值,样品在现场用5%的甲醛溶液固定。同时使用多参数便携式水质分析仪(WTW Multi3630 IDSSETG)测定水温(Water temperature, T)、盐度(Salinity, S)、pH、溶解氧(Dissolved oxygen, DO)等环境数据。

依据相关文献^[1, 24-25],在Olympus SZX7解剖镜下,从采集的样品中分离、鉴定出刀鲚、凤鲚的鱼卵、仔稚鱼。参照张冬良等^[26]和KENDALL等^[27-28]的方法划分鱼卵、仔稚鱼的发育阶段并计数,使用游标卡尺或目测微尺测量仔稚鱼的脊索长(Notochord length, NL:前弯曲期仔鱼和弯曲期仔鱼测量吻端至脊索末端的长度)或标准体长(Standard length, SL:后弯曲期仔鱼、稚鱼和幼鱼测量吻端到尾下骨后缘的长度)和鱼卵卵径(单位:mm)。



S. 南支; N. 北支; E. 崇明岛东滩。

S. South branch; N. North branch; E. Dongtan of Chongming Island.

图1 长江口采样站点

Fig. 1 Sampling stations in the Yangtze River estuary

1.2 数据分析

鱼卵、仔稚鱼的丰度计算公式:

$$D = \frac{N}{(C \times Q) \times S} \quad (1)$$

式中: D 表示鱼卵、仔稚鱼丰度, ind./m³; N 为每网所采捕捞的仔稚鱼数量, 尾; C 为流量计校正值, $C=0.3 \text{ m/r}$; Q 为流量计转数, r ; S 为大型仔稚鱼网网口面积, m²。

构建 GAM 模型过程中,季度作为分类变量,以环境因子温度、盐度、pH、溶解氧和水深(Water depth, Dep)作为解释变量,共线性采用方差膨胀因子(Variance inflation factor, VIF)和矩阵条件数(Condition number, CN)进行分析, GAM 模型的表达式如下:

$$\log(D+1) = Season + \varepsilon + s(x_1) + s(x_2) + \dots + s(x_n) \quad (2)$$

根据赤池信息准则(Akaike Information Criterion, AIC)和解释率筛选最优组合模型,一般认为 AIC 值越低,偏差解释率越高,模型拟合效果越好。

$$AIC=2k - 2\ln L \quad (3)$$

式中: k 为参数的个数, L 为似然函数。

在筛选出最优组合模型后,通过 GAM 交互效应模型分析对仔稚鱼丰度有显著影响的环境因子之间的交互作用:

$$\log(D+1) = Season + \varepsilon + s(x_n) + te(x_i, x_j) + \dots + te(x_m, x_n) \quad (4)$$

数据通过 Microsoft Excel 2019、Ocean Data View 5.7.1、R (v4.4.1) mgcv、ggplot2 等包进行 GAM 分析和绘图^[29-32]。

2 结果与分析

2.1 发育阶段

调查期间未采集到刀鲚鱼卵,春季采集凤鲚鱼卵 10 387 粒,夏季较多,采集到 12 561 粒,处于 A 阶段的鱼卵为 52.99 % (表 1)。

表 1 凤鲚鱼卵的发育阶段组成
Tab. 1 Composition of development stages of *C. mystus* eggs

发育阶段 Developmental stage	卵径 Egg diameter/mm	占比 Proportion/%	
		夏季 Summer	春季 Spring
A	0.948±0.003 8 ^{bc}	30.32	22.67
B	0.928±0.001 5 ^{cd}	11.71	11.32
C	0.974±0.000 8 ^{ab}	12.70	11.28

注:A 包括未受精和受精的卵,从发育的最早阶段直到胚孔闭合;B 包括胚体形成到尾芽开始与卵黄分离的阶段;C:尾芽与卵黄分离(tail free)到孵出的阶段。

Notes: A means Eggs inclusive of both unfertilized and fertilized, from the earliest stage of development until closure of the blastopore; B Includes stages from the end of "A" till the tail-bud begins to separate off the yolk; C means the stage from the end of "B" to hatching.

4 个季度共采集到刀鲚仔稚鱼 2 244 尾(表 2),2022 年夏季占比最高,各发育阶段个体均有出现,2023 年春季次之,秋季仅采集到刀鲚稚鱼,冬季未采集到刀鲚仔稚鱼。从发育阶段看,前弯曲期仔鱼(Pre-flexion larvae)和弯曲期仔鱼(Flexion larvae)占比最高,分别为 69.43 % 和 18.63 %,卵黄囊期仔鱼(Yolk-sac larvae)占比最低,且仅出现于夏季。采集凤鲚仔稚鱼 46 703 尾,在夏季和春季仔稚鱼的各发育阶段均有出现,春季时前弯曲期仔鱼最多;夏季时卵黄囊期、前弯曲期和弯曲期仔鱼的尾数占比均大于 20 %;秋季未采集到卵黄囊期仔鱼,以后弯曲期仔鱼和稚鱼为主;冬季采集到凤鲚幼鱼。

2.2 时空分布

从丰度的季节分布来看(图 2),刀鲚仔稚鱼主要出现在夏季,春季次之。夏季主要分布在长江口南支,除 S6 外各个站点均有出现,其中 S8 站点丰度最高(1.63 ind./m³),S2 次之(图 2a),平均丰度 0.06 ind./m³。春季平均丰度 0.02 ind./m³,S10 站点丰度最高(0.73 ind./m³),与夏季无显著差异($P>0.05$)。从发育阶段看,春季以仔鱼期为主;夏季仅在南支的上游 S1 和 S3 两个站点采集到刀鲚卵黄囊期仔鱼;E1-E4 站点主要为弯曲期和后弯曲期仔鱼,E5-E10 站点以稚鱼和幼鱼为主;北支水域仅在 N1-N5 站点出现刀鲚仔稚鱼,N1 和 N2 站点全部为幼鱼,N3 站点存在刀鲚后弯曲期仔鱼和稚鱼,平均丰度为 0.01 ind./m³(图 3a)。

表2 长江口刀鲚、凤鲚仔稚鱼发育阶段组成
Tab. 2 Composition of development stages of *C. nasus*, *C. mystus* larvae and juveniles in the Yangtze River Estuary

种名 Species	发育阶段 Developmental stage	体长范围 Body length range/mm	占比 Proportion/%			
			夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	春季 Spring
刀鲚 <i>C. nasus</i>	Yolk-sac	4.20~4.52	0.45	—	—	—
	Pre	3.50~9.86	28.48	—	—	40.95
	F	8.58~15.22	18.63	—	—	—
	Post	12.66~21.48	8.11	—	—	—
	J	19.83~38.48	2.09	0.04	—	—
	Y	36.14~102.78	1.16	—	—	0.04
凤鲚 <i>C. mystus</i>	Yolk-sac	3.16~5.16	10.10	—	—	1.65
	Pre	4.05~9.69	16.49	+	—	45.56
	F	7.16~15.72	15.71	+	—	2.11
	Post	12.14~23.96	5.02	0.04	—	0.22
	J	19.41~31.45	0.30	0.04	—	+
	Y	31.23~95.28	0.09	+	+	+

注: Yolk-sac. 卵黄囊期仔鱼; Pre. 前弯曲期仔鱼; F. 弯曲期仔鱼; Post. 后弯曲期仔鱼; J. 稚鱼; Y. 幼鱼; +. 尾数百分比<0.01%。
Notes: Yolk-sac. yolk-sac larvae; Pre. pre-flexion larvae; F. flexion larvae; Post. post-flexion larvae; J. juvenile fish; Y. young fish; +. Percentage <0.01%.

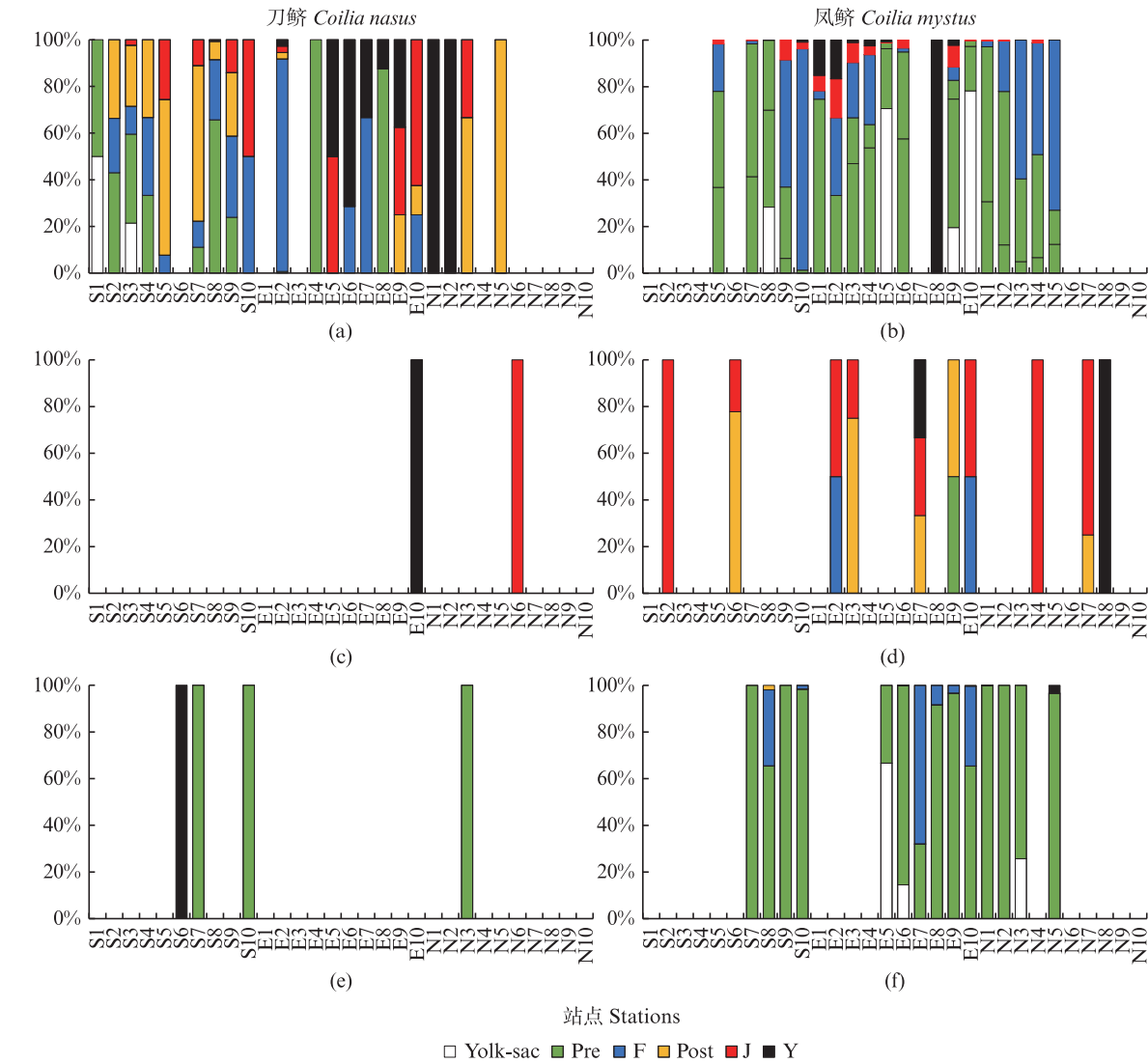
仅在夏季和春季采集到凤鲚鱼卵,主要分布于N2-N6和S5-S8站点,夏季平均丰度(5.63 ind./m³)高于春季平均丰度(3.18 ind./m³)。N3和N4总丰度最高,分别为18.78 ind./m³、22.67 ind./m³。凤鲚仔稚鱼在夏季和春季都有较高的丰度,夏季平均丰度0.69 ind./m³,春季平均丰度0.42 ind./m³,无显著差异($P>0.05$)。夏季广泛分布于S5-S10、E1-E10和N1-N5站点,平均丰度为1.45 ind./m³,S8站点丰度最高(17.13 ind./m³)(图2b)。卵黄囊期仔鱼出现在S8、E5、E9和E10站点,S8和E10丰度最高,分别为4.56 ind./m³、0.97 ind./m³。S5、S7和S8站点主要为前弯曲期仔鱼,S9和S10站点则为弯曲期仔鱼;稚鱼和幼鱼主要分布于E1-E10,北支主要为前弯曲期和弯曲期仔鱼,从N1到N5站点弯曲期仔鱼占比逐渐升高(图3b)。秋季口门水域凤鲚仔稚鱼平均丰度小于0.01 ind./m³(图2d),大部分为后弯曲期仔鱼和稚鱼,主要分布在崇明岛东滩。春季时,凤鲚仔稚鱼集中分布于S7-S10、E5-E10和N1-N5站点,N1站点丰度最高为10.03 ind./m³(图2f),前弯曲期仔鱼占比最高,在E5、E6和N3站点存在卵黄囊期仔鱼(图3f)。

2.3 环境因子对仔稚鱼丰度的影响

2.3.1 环境因子

长江口水温总体呈现从口内向口外逐渐递增趋势(图4)。2022年夏季的水温范围为29.00~33.90℃,平均水温30.85℃,最高水温位于横沙岛、九段沙和北支N6-N9附近水域。秋季水温约16.60~21.10℃,平均为18.15℃,南支自上游向下游逐渐升高;冬季水温最低6.10~13.00℃;2023年春季水温在17.00~22.70℃,平均水温20.73℃。北支N4、N5站点附近水域水温整体偏低。除冬季外,南支、北支、崇明岛东滩3个组间水温无显著差异。

长江口盐度的总体范围为0.01~30.50,且盐度的分布趋势与水温相似,自南支向北支,口内向口外逐渐增大(图4)。长江口南支与北支水域的盐度存在显著差异($P<0.01$)。南支大部分水域(S1-S6)和崇明岛东滩沿岸水域(E1-E4)为低盐度,盐度小于1,长兴岛下游水域盐度逐渐增大,春季平均盐度最低,E8站点最高(9.40~24.40)。北支表层平均盐度高于10,春、夏季显著低于秋、冬季($P<0.01$),北支盐度夏季变化较春季大:N1站点最低为0.2,N7站点最高为20.50;春季N1盐度最低为8.60。



(a)和(b). 夏季; (c)和(d). 秋季; (e)和(f). 春季。

(a)and(b). Summer; (c)and(d). Autumn; (e)and(f). Spring.

图3 各站点发育阶段组成变化

Fig. 3 Changes in the composition of developmental stages across sampling stations

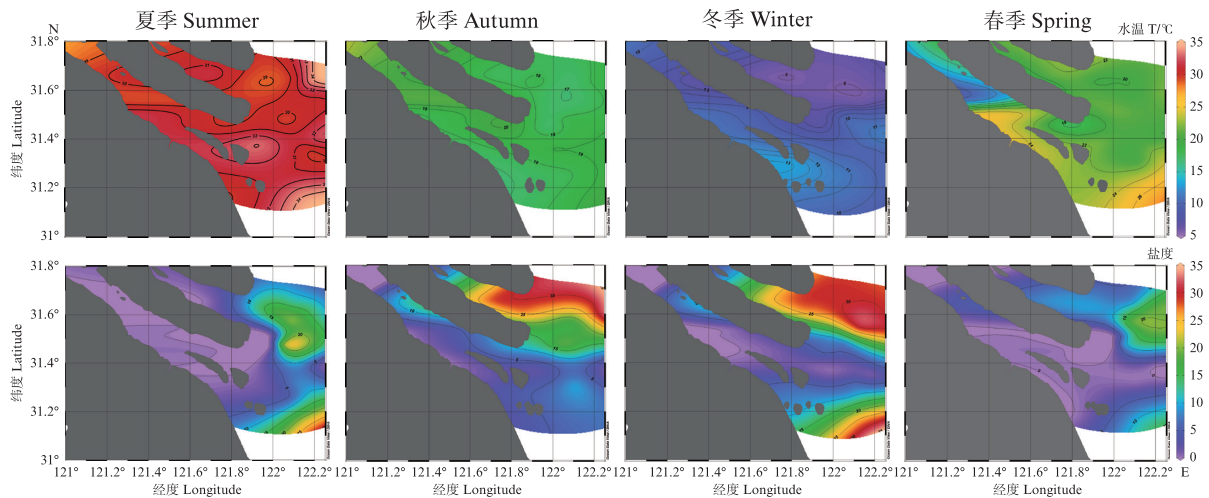


图4 水温和盐度的季节变化

Fig. 4 Seasonal variations in temperature and salinity

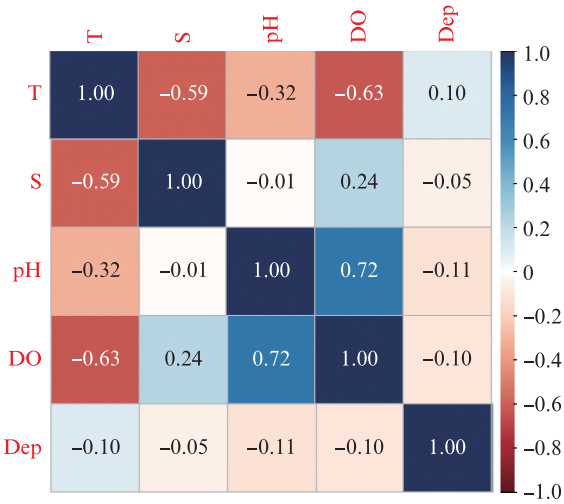


图5 环境因子的皮尔逊相关系数

Fig. 5 Pearson correlation coefficient of environmental factors

表3 共线性检验

Tab. 3 Collinearity test

环境因子 Environmental factors	方差膨胀因子 VIF	特征值 Eigenvalue	矩阵条件数 CN
T	2.548	2.326	12.706
S	1.660	1.188	
pH	2.285	0.973	
DO	3.281	0.330	
Dep	1.019	0.183	

表4 基于AIC的GAM模型选择

Tab. 4 Selecting optimal GAM model based on AIC

模型 Model	刀鲚 <i>C. nasus</i>			凤鲚 <i>C. mystus</i>		
	AIC	R^2	偏差解释率 Deviance explained/%	AIC	R^2	偏差解释率 Deviance explained/%
$\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(T) + s(S) + s(\text{pH}) + s(\text{DO}) + s(\text{Dep})$	81.55	0.65	71.70	101.94	0.70	79.60
$\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(T) + s(S) + s(\text{pH}) + s(\text{DO})$	64.80	0.49	68.83	72.24	0.71	79.56
$\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(T) + s(S) + s(\text{pH})$	66.03	0.46	64.53	87.37	0.59	67.48
$\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(T) + s(S) + s(\text{DO})$	62.84	0.51	69.05	78.22	0.66	74.04
$\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(T) + s(S) + s(\text{Dep})$	88.39	0.59	67.12	112.71	0.54	61.10
$\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(T) + s(\text{pH}) + s(\text{DO})$	79.71	0.06	18.18	120.71	0.29	44.67
$\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(S) + s(\text{pH}) + s(\text{DO})$	63.51	0.51	69.16	72.35	0.70	78.99
$\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(T) + s(S)$	64.98	0.47	62.86	86.16	0.60	67.27
$\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(T) + s(\text{pH})$	78.04	0.11	24.52	114.15	0.38	54.44
$\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(T) + s(\text{DO})$	78.11	0.08	18.08	126.84	0.13	20.12
$\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(T) + s(\text{Dep})$	91.39	0.57	63.11	114.58	0.49	54.44
$\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(S) + s(\text{Dep})$	123.14	0.28	37.08	132.72	0.20	52.44
$\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(S) + s(\text{pH})$	63.75	0.50	67.36	87.07	0.59	67.07
$\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(S) + s(\text{DO})$	61.60	0.53	69.25	76.61	0.67	74.28

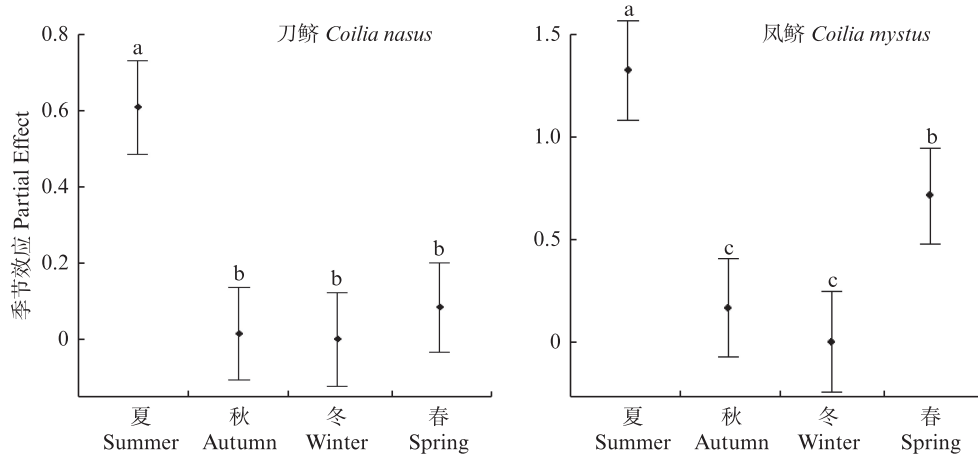


图6 季节效应对刀鲚、凤鲚仔稚鱼丰度的影响

Fig. 6 Effects of Seasons on the density of *C. nasus*, *C. mystus* larvae and juveniles

盐度与刀鲚丰度之间存在双峰的非线性关系,两个峰分别在0~6和10~18,前者高于后者(图7a)。刀鲚仔稚鱼丰度随盐度的增加,呈先增加后减少的趋势。第一个峰盐度小于4时,丰度随盐度增高而增加;第二个峰峰值出现在12~15。结果表明,刀鲚仔稚鱼的适宜盐度在0~18,最适盐度在0~6。溶解氧对刀鲚仔稚鱼丰度的影响表现为,随着溶解氧的增大,丰度呈现先缓慢增高后降低的变化趋势,峰值出现在7.6(图7b)。

5~18 °C时,凤鲚仔稚鱼丰度随着水温的升高而降低,当水温升高至18 °C后,丰度随水温升高而升高。在20~34 °C时,凤鲚仔稚鱼丰度呈现“M”波动变化,在20~25 °C和28~34 °C各有1个峰(图7c)。凤鲚仔稚鱼丰度随盐度的增加,呈先增加后缓慢减少的趋势,盐度5时丰度最高,适宜盐度在2~16(图7d)。凤鲚仔稚鱼的丰度在pH 7.0~8.5存在双峰,峰值分别在7.3和8.2左右(图7e)。溶解氧在8.0 mg/L附近时,凤鲚仔稚鱼丰度最高,达到9.0 mg/L后,随着溶解氧的增高凤鲚仔稚鱼丰度降低,适宜溶解氧为6.0~9.0 mg/L(图7f)。

2.3.4 环境因子的交互作用

在刀鲚的最优 GAM 模型 $\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(S) + s(\text{DO})$ 中,盐度和溶解氧之间不存在显著的交互作用。在凤鲚的最优模型 $\log(D+1) = \text{Season} + \varepsilon + s(T) + s(S) + s(\text{pH}) + s$

(DO)中,存在温度-盐度、温度-pH两个交叉解释变量有显著的交互作用($P < 0.01$)。

环境因子的交互作用中,温度占主导地位,凤鲚仔稚鱼的丰度随温度的升高而显著增加(图8)。在与不同环境因子作用下,又存在各自的特点。温度较低时,在中盐度、pH 7.5附近凤鲚仔稚鱼的丰度较高;随着温度升高到30 °C,盐度响应呈双峰特征,丰度在低盐和高盐区域均存在高值,pH在8时,凤鲚仔稚鱼丰度较高。

3 讨论

3.1 各发育阶段的时空分布

长江口刀鲚为溯河洄游性鱼类,在产卵时期,由海入江进行洄游,上溯远至湖南省洞庭湖,近及长江下游苏通江段^[1]。在长江下游安徽安庆、南通如皋、上海等多个江段都存在刀鲚的产卵场^[33]。而在长江口鱼卵、仔稚鱼研究中未见刀鲚鱼卵存在^[34-37],本研究水域中也未采集到刀鲚鱼卵。长江口刀鲚2龄时达到性成熟,繁殖期在4月下旬到6月之间,4月以卵巢发育至Ⅱ期个体为主,5月以Ⅳ期为主,6月以Ⅲ期和Ⅳ期为主^[38]。在长江下游苏通江段(刀鲚种质资源保护区)存在刀鲚产卵场,薛向平等^[39]5—8月在江苏如皋至崇明岛绿华镇水域采集到刀鲚受精卵,高丰度区域出现在如皋江段,表明刀鲚受精卵在经过长江口口门进入南支前已基本完成孵化。

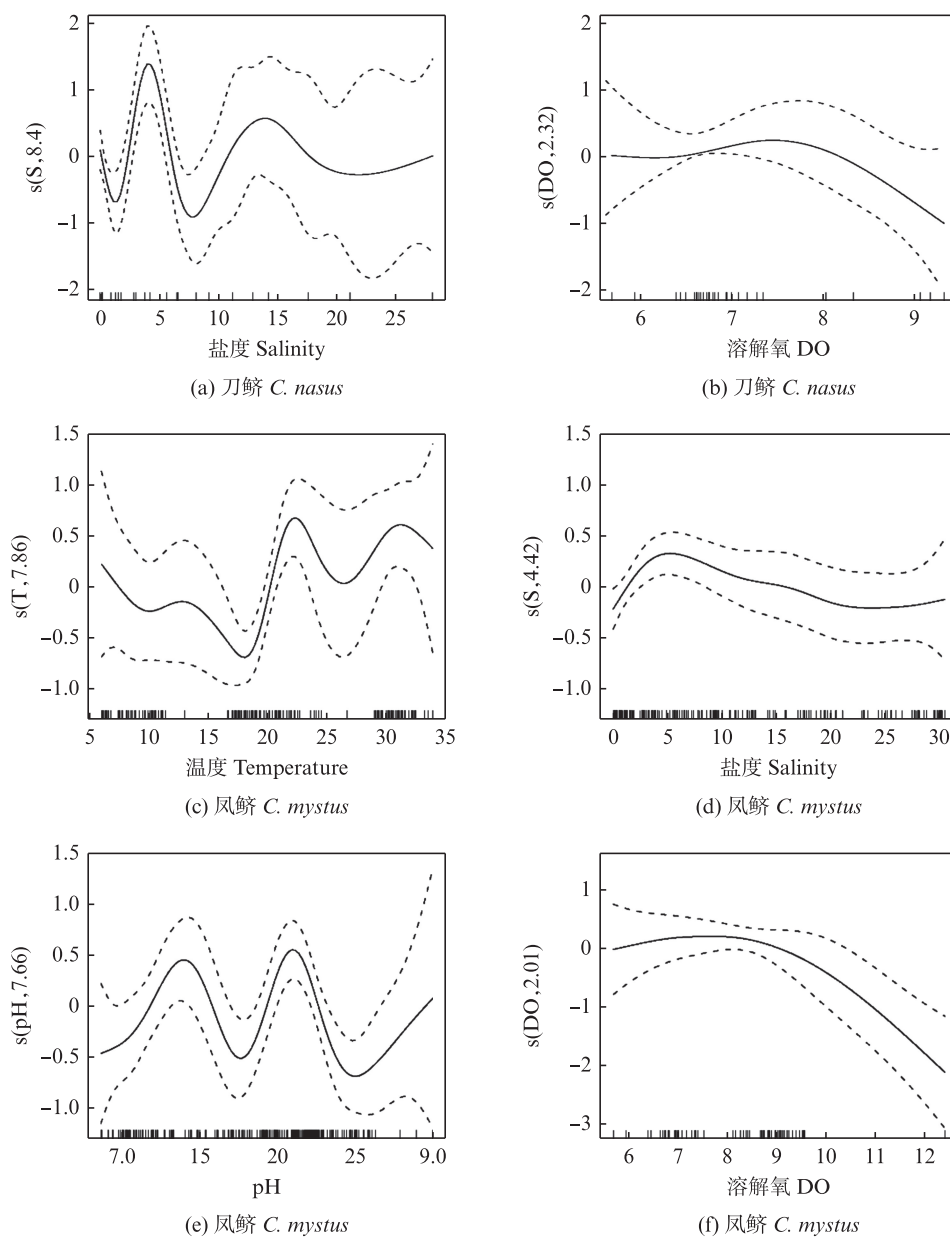


图7 环境因子对刀鲚、凤鲚仔稚鱼丰度的影响

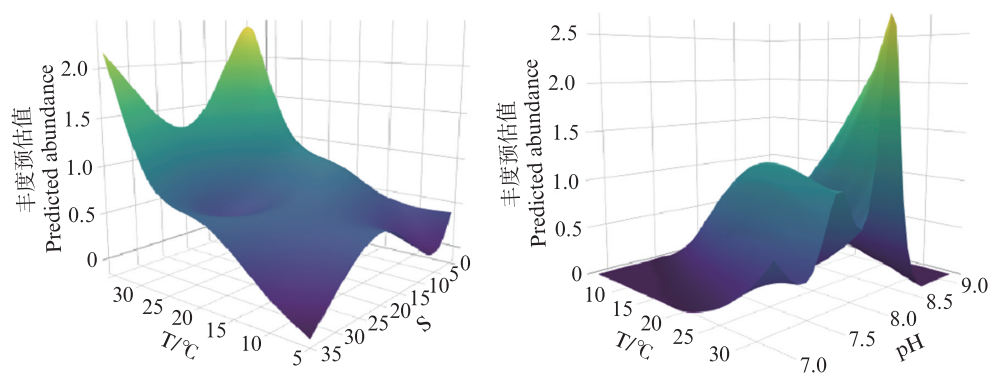
Fig. 7 Effects of environmental factors on the density of *C. nasus*, *C. mystus* larvae and juveniles

图8 环境因子交互作用对凤鲚丰度的影响

Fig. 8 The impact of environmental factor interactions on the abundance of *C. mystus*

长江口鱼类丰度具有明显的季节变化特征,表现为夏季渔业资源丰富,冬季较低^[15, 40]。长江口大多数鱼类的繁殖期在春季和夏季,少数为秋冬季,洄游性鱼类周期性利用河口作为产卵场、保育场,这种动态性质很大程度上取决于季节变化,突显了不同鱼类对生态系统利用的差异性^[41]。不同季节刀鲚在长江口的分布呈现出不同的特征,仔稚鱼的分布也存在着明显的季节性偏差^[42]。本研究刀鲚仔稚鱼夏季丰度最高,春季次之。春季刀鲚仔稚鱼仅在南支下游S7、S10和北支的N3站点分布,全部为前弯曲期仔鱼。夏季时刀鲚仔稚鱼在长江口南支、北支N1-N5站点和崇明岛东滩均有分布,前弯曲期和弯曲期仔鱼最多,占80%,南支S1、S3站点采集到卵黄囊期仔鱼,表明刀鲚在7、8月均有产卵,此时是刀鲚的繁殖盛期。秋季时未采集到刀鲚仔鱼,葛珂珂等^[37]调查发现刀鲚仔稚鱼5—10月出现在崇明南支及北支上游的碎波带,9—10月刀鲚仔稚鱼出现数量少且分散。刀鲚仔鱼的空间分布主要受到长江冲淡水和潮汐等因素的影响。刀鲚产卵场位于长江口的上游水域,早期发育阶段仔鱼的鳍未发育完全,游泳能力较弱,从长江口南支上游随冲淡水向下移动。被长兴岛-横沙岛分为两支,分别进入北港、南港。随着生长发育,游泳能力增强,仔鱼能够自主选择方向,部分会在横沙岛东滩附近水域(S8)聚集,从卵黄囊期到后弯曲期阶段的出现频率增加。另一部分漂移到崇明岛东滩水域,少量仔稚鱼在潮汐、盐水倒灌等因素作用下进入长江口北支。

长江口凤鲚繁殖期一般为4—10月,产卵盛期通常为5—8月^[43]。凤鲚栖息于河口及近海一带,溯河洄游到近岸咸淡水区产卵,受精卵随长江径流漂流至河口区和杭州湾一带水域孵化,仔稚鱼一般在咸淡水交汇的河口区和杭州湾水域索饵、发育。有研究表明长江口、杭州湾、舟山群岛附近海域都存在凤鲚的产卵场^[44-45]。本研究中华凤鲚受精卵的分布主要集中在北支口门和长兴岛-横沙岛附近水域,分别对应咸淡水、淡水两种不同的生态履历类型。凤鲚仔稚鱼围绕产卵场呈辐射状分布,与刀鲚产卵场分布的不同也导致了两者在不同水域发育阶段组成的差异。毕雪娟通过计算栖息地适合度指数发现北支栖息地适宜指数较高,存在大量凤鲚仔稚鱼^[46]。胡丽娟

等^[16]对长江口凤鲚主要繁殖期的调查显示北支的东旺沙-启隆乡沿岸水域为凤鲚仔稚鱼主要分布水域和重要育幼场。春夏两季长江口凤鲚的各个发育阶段均有出现,且采集到大量凤鲚卵黄囊期和前弯曲期仔鱼,说明5月到8月是凤鲚的繁殖盛期^[47]。夏季时凤鲚仔鱼各发育阶段的数量分布较春季时更均匀。杨钧渊等^[48]调查显示凤鲚仔稚鱼夏季密度最高,出现在北支口门,但在南支水域也有少量分布。王东通过构建凤鲚早期个体的物理-生物耦合模型提出了长江口凤鲚保育场具有双核心分布的特点,分别在长江口北支口门、崇明东滩附近和南北槽口门附近^[49]。本研究的结果也验证了长江口凤鲚保育场具有双核心分布特点,春季时南支水域受冲淡水的影响温度变化剧烈、盐度较低,北支水域环境较为稳定,凤鲚仔稚鱼集中于北支,夏季时汇集在横沙岛东滩附近水域。

3.2 环境因子对仔稚鱼丰度的影响

作为长江淡水生态系统和东海海洋生态系统的过渡水域,复杂的环境促使长江口成为初级生产力水平高、生物群落结构复杂多样、生物资源丰富的区域,这也导致该区域受径流和潮汐为主的持续的环境波动^[42, 50]。环境因素中水温、盐度、潮汐等对鱼类早期阶段的空间分布均有较大影响^[19-20]。

水温是驱动鱼类进行生殖洄游的重要因子,影响仔稚鱼的时空分布。适宜的水温是促进鱼类性腺成熟的必要条件,春季水温回升后,刀鲚成群聚集在长江口南支口门附近水域,开始进行生殖洄游。当水温提前达到适宜温度时,性腺快速发育使鱼类提前进入产卵期,使不同水域仔稚鱼高峰期相应提前。水温还影响鱼卵的孵化率和孵化时间,当偏离适宜水温时会导致胚胎死亡,孵化所需的时间长短与水温成反比,最适孵化水温为25~27℃^[51]。GAM模型显示凤鲚仔稚鱼的适宜温度为20~32℃,存在两个峰,分别对应春季和夏季表层水温。胡丽娟等^[16]的结果表明凤鲚仔稚鱼丰度在5—6月最高,适宜的温度在20~28℃。夏季日间表层水温较高,具有一定游泳能力的仔稚鱼垂直移动到较深水层。温度在环境因子的交互作用中表现出对仔稚鱼丰度的核心调控作用,并与盐度、pH环境因子存在显著的非线性耦合效应。盐度和pH的调节作用在不

同温度区间呈现出显著的异质性:低温条件下(< 20 °C),盐度、pH的协同效应可能通过渗透压调节和骨骼矿化提升仔稚鱼存活率^[52];而高温环境(>30 °C)中,盐度和pH响应的双模态分布解释了种群内存在的生态类型分化现象,这可能与河口生境中淡水输入和海水潮汐的周期性波动相关,反映出物种对异质环境的适应权衡。

长江口水域盐度对刀鲚密度的影响表现出一定的多峰响应模式,分别在盐度为5、15和25形成三个峰值^[53]。本研究GAM模型显示盐度对刀鲚的影响表现为双峰,在不同盐度水域发育阶段组成不同,仔鱼阶段主要出现在淡水和咸淡水水域,在北支高盐度水域较少出现;高盐度水域出现的刀鲚大多为稚鱼和幼鱼,即随着生长发育,刀鲚对盐度的耐受增强,盐度是限制其空间分布的重要环境因子。杨琴等^[54]研究表明凤鲚具有多种洄游履历类型,凤鲚群体能适应的盐度范围较广。凤鲚仔稚鱼在横沙岛东滩的低盐水域和北支口门高盐水域均有较高丰度,适宜盐度为2~16。两种鱼类不同的耐盐性是环境因子效应存在差异的关键因素,渗透压调节会消耗大量

能量导致存活率降低。溶解氧也会影响鱼类数量和空间分布,HAJISAMAE等^[55]研究发现水体溶解氧和鱼类生物量之间存在显著正相关关系。刀鲚和凤鲚的适宜溶解氧均为6~9,随着溶氧升高丰度反而降低,主要原因是高溶氧出现在浮游生物生物量低的冬季。

3.3 禁渔前后比较

禁渔前对长江口刀鲚仔稚鱼的资源调查主要集中于南支水域(表5),李安东等^[56]、侯世挺等^[20]、饶元英等^[19]的调查显示刀鲚仔稚鱼各年出现的时间基本相似,主要出现于6—9月,平均密度为0.031~0.123 ind./m³。与本研究中南支口门内相近的站点资源量基本相似,而丰度最大站点出现在横沙岛东滩水域。刘欢等^[23]对崇明东滩夏秋季仔稚鱼空间分布的调查显示北支站点凤鲚密度明显大于刀鲚密度,刀鲚密度最大出现在南支(0.74 ind./m³)。本研究也在北支水域发现刀鲚稚鱼和幼鱼分布,且资源量和分布范围有所增大,说明禁渔后刀鲚仔稚鱼资源具有稳定趋势。

表5 往年仔稚鱼资源调查结果
Tab. 5 Survey results of fish larvae and juveniles in previous years

年份 Year	月份 Month	站点 Stations	丰度(ind./m ³)/优势度(IRI) Abundance/Dominance		来源 Sources
			刀鲚 <i>C. nasus</i>	凤鲚 <i>C. mystus</i>	
2010—2011	5、8	长江口	*	466.30~2 911.62 (1 201.32)***	蒋玫等 ^[57]
2014	5、6	邻近水域	*	0~0.44 / 160.54~322.83***	刘媛媛等 ^[21]
2014	3—9	南支	0~0.63(0.031)	—	李安东等 ^[56]
2015	4—7	邻近水域	*	583.08***	李建生等 ^[22]
2015	3—12	南支	**	*	侯世挺等 ^[20]
2018	6—10	南支	0~2.151(0.123)	—	饶元英等 ^[19]
2018	6、9	崇明东滩	0~0.740 / ***	0~0.380 / ***	刘欢等 ^[23]
2019	5—10	长江口	—	0~23.94	胡丽娟等 ^[16]
2020	5、8	长江口	—	0~44.02 / ***	林军 ^[58]
2021	4、8	崇明东滩	**	0~1.122/2 695.35***	杨钧渊等 ^[48]
2022—2023	8、11、2、5	长江口	0~1.63/**	0~17.13 / ***	本研究

注:—,未调查;*,未检出;**非优势种;***,优势种。

Notes: —, not investigated; *, not detected; **, non-dominant species; ***, dominant species.

2010—2011年凤鲚在长江口仔稚鱼中均为优势种^[57];刘媛媛等^[21]和李建生等^[22]对长江口邻近水域仔稚鱼的调查中仅在6月出现且丰度较低,最大仅为0.44 ind./m³;2018年6月北支凤鲚丰度最大为0.38 ind./m³^[23]。2019年禁止凤鲚生产性

捕捞后,早期资源明显恢复。2019年在长江口凤鲚仔稚鱼的调查中6月丰度最高为23.94 ind./m³^[16],2020年春季丰度最大为44.02 ind./m³^[58]。而在长江禁捕后,凤鲚仔稚鱼出现的高峰期发生变化。2021年崇明东滩水域凤鲚仔稚鱼仅在夏

季(8月)为优势种,最大丰度为 1.122 ind./m^3 ^[48]。本研究中凤鲚仔稚鱼夏季最大丰度为 17.13 ind./m^3 ,平均丰度为 0.69 ind./m^3 ,也均高于春季,说明在长江禁捕后,凤鲚仔稚鱼出现的高峰期从春季推迟至夏季,该现象是否与环境变化或者是种群差异有关,还有待于今后从多维度进行探讨。

4 结论

长江口刀鲚仔稚鱼的保育场和凤鲚的产卵场、保育场有所重叠,产卵场分布的不同、长江冲淡水和潮汐等的共同影响使得两者不同发育阶段的分布存在差异。繁殖期刀鲚仔鱼主要分布在长江口南支,稚鱼存在于南支下游和崇明岛东滩水域,幼鱼阶段时在崇明岛东滩和长江口北支水域出现。凤鲚主要分布于长江口南支下游、崇明岛东滩的咸淡水和北支咸水水域。全年凤鲚仔稚鱼的出现频率较高,秋季仍能采集到弯曲期仔鱼。通过 GAM 分析环境因子对刀鲚、凤鲚仔稚鱼分布的影响,盐度对刀鲚仔稚鱼的丰度影响显著,适宜盐度为 0~6;温度、盐度、pH 对凤鲚仔稚鱼的丰度影响显著。交互效应模型分析发现温度-盐度、温度-pH 两个交叉解释变量对凤鲚仔稚鱼的丰度有显著影响。本研究为单一年份的周年季度调查,可能存在一定的偶然性,应对长江口刀鲚、凤鲚仔稚鱼进行 3 年或 5 年的长期监测,进行资源变动的多年比较。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 倪勇,伍汉霖. 江苏鱼类志[M]. 北京:中国农业出版社, 2006: 205-208.
NI Y, WU H L. Fishes of Jiangsu Province [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 203-208.
- [2] 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.
ZHUANG P, WANG Y H, LI S F, et al. Fishes of the Yangtze Estuary [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2006: 157-160.
- [3] 毛成贵,矫新明,钟俊生,等. 长江口刀鲚资源现状及保护研究进展[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2015, 24(3): 78-83.
MAO C Z, JIAO X M, ZHONG J S, et al. Research Progress on Resource Status and Protection of *Coilia nasus* in Yangtze River Estuary [J]. Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Science Edition), 2015, 24(3): 78-83.
- [4] 李宇,陈建华,冯广朋,等. 长江溯河洄游型刀鲚生活史及资源养护研究进展[J]. 海洋渔业, 2024, 46(6): 788-796.
LI Y, CHEN J H, FENG G P, et al. Research Progress on Life History and Resource Conservation of Anadromous *Coilia nasus* in the Yangtze River [J]. Marine Fisheries, 2024, 46(6): 788-796.
- [5] KISHIDA T. Fluctuations in year-class strength of Japanese Spanish mackerel in the central Seto Inland Sea [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1991, 57(6): 1103-1109.
- [6] D'ALESSANDRO E K, SPONAUGLE S, COWEN R K. Selective mortality during the larval and juvenile stages of snappers (Lutjanidae) and great barracuda *Sphyrna barracuda* [J]. Marine Ecology Progress Series, 2013, 474: 227-242.
- [7] OVERTON A S, JONES N A, RULIFSON R. Spatial and Temporal Variability in Instantaneous Growth, Mortality, and Recruitment of Larval River Herring in Tar-Pamlico River, North Carolina [J]. Marine and Coastal Fisheries, 2012, 4: 218-227.
- [8] 董文霞,唐文乔,王磊. 长江刀鲚繁殖群体的生长特性[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(5): 669-674.
DONG W X, TANG W Q, WANG L. Growth characteristics of reproductive population of *Coilia nasus* in the Yangtze River [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(5): 669-674.
- [9] 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.
ZHAO F, YANG Q, SONG C, et al. Biological characteristics and resource utilization of *Coilia mystus* in the Yangtze Estuary [J]. Marine Fisheries, 2020, 42(1): 110-119.
- [10] 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.
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.
- [11] 胡永斌. 长江口凤鲚和刀鲚年龄结构与生长特征的初步研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2020.
HU Y B. A preliminary study on the age structure and growth characteristics of *Coilia mystus* and *Coilia nasus* in the Yangtze River Estuary [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- [12] 姜涛,杨健,刘洪波,等. 刀鲚、凤鲚和湖鲚矢耳石的形态学比较研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(3): 23-31.
JIANG T, YANG J, LIU H B, et al. A comparative study of the morphology of sagittal otolith in *Coilia nasus*, *Coilia mystus* and *Coilia nasus taihuensis* [J]. Marine

- Sciences, 2011, 35(3): 23-31.
- [13] 张涛, 王焕焕, 毕学娟, 等. 长江口凤鲚仔稚鱼不同发育阶段矢耳石生长[J]. 中国水产科学, 2017, 24(6): 1315-1322.
- ZHANG T, WANG H H, BI X J, et al. Sagittal otolith growth and development at different development stages in larval and juvenile *Coilia mystus* in the Yangtze estuary [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(6): 1315-1322.
- [14] 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.
- 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.
- [15] 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.
- [16] 胡丽娟, 宋超, 耿智, 等. 长江口凤鲚仔稚鱼主要繁殖季节的时空分布特征[J]. 中国水产科学, 2021, 28(9): 1152-1161.
- HU L J, SONG C, GENG Z, et al. Temporal and spatial distribution of *Coilia mystus* larvae and juveniles in the Yangtze Estuary during primary breeding season [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(9): 1152-1161.
- [17] 杨柯迹, 陈锦辉, 赵静, 等. 长江口鱼类群落粒径结构特征及群落稳定性评估[J]. 水产学报, 2024, 48(6): 85-96.
- YANG K E, CHEN J H, ZHAO J, et al. Size structure and community stability assessment of fish community in the Yangtze River estuary [J]. Journal of fisheries of China, 2024, 48(6): 85-96.
- [18] 孙浩奇, 蒋日进, 陈峰, 等. 瓯江口凤鲚鱼卵、仔稚鱼的时空分布及其与环境因子关系[J]. 水生生物学报, 2022, 46(7): 963-973.
- SUN H Q, JIANG R J, CHEN F, et al. Spatiotemporal distribution of eggs and larvae of *Coilia mystus* and its relationship with environmental factors along Oujiang estuary [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2022, 46(7): 963-973.
- [19] 饶元英, 钟俊生, 刘欢, 等. 长江口南支水域刀鲚仔稚鱼资源量的年度变化[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(5): 828-836.
- RAO Y Y, ZHONG J S, LIU H, et al. Annual variation of the resources of *Coilia nasus* larvae and juveniles in the southern branch of the Yangtze River estuary [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(5): 828-836.
- [20] 侯世挺, 钟俊生, 王晓东, 等. 长江口南支仔稚鱼数量随潮汐变化的研究[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(2): 250-258.
- HOU S T, ZHONG J S, WANG X D, et al. The study on the amount changes of fish larvae during flood and ebb in the south branch of Yangtze River Estuary [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2018, 27(2): 250-258.
- [21] 杨阳阳, 杨杰青, 王云龙, 等. 长江口浮游动物群落结构时空变化特征研究[J]. 海洋渔业, 2023, 45(4): 447-459.
- YANG Y Y, YANG J Q, WANG Y L, et al. Spatial and temporal variation of zooplankton community structure in the Yangtze Estuary [J]. Marine Fisheries, 2023, 45(4): 447-459.
- [22] 李建生, 林楠, 凌建忠. 春夏季长江口邻近水域仔稚鱼种类组成和丰度的月变化[J]. 中国水产科学, 2018, 25(3): 586-594.
- LI J S, LIN N, LING J Z. Temporal variation in the composition and abundance of fish larvae and juveniles off the Yangtze River Estuary in spring and summer [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(3): 586-594.
- [23] 刘欢, 陈锦辉, 吴建辉, 等. 长江口崇明东滩夏季仔稚鱼的空间分布[J]. 水产学报, 2021, 45(8): 1395-1405.
- LIU H, CHEN J H, WU J H, et al. Analytical research of spatial distribution of fish larvae and juveniles in summer and autumn in the eastern Chongming, Yangtze River Estuary [J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(8): 1395-1405.
- [24] 万瑞景, 张仁斋. 中国近海及其邻近海域鱼卵与仔稚鱼 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2016: 20-22.
- WAN R J, ZHANG R Z. Fish eggs, larvae and juveniles in the offshore waters of China and their adjacent waters [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2006: 20-22.
- [25] OKIYAMA M. An Atlas of Early Stage Fishes in Japan. 2nd [M]. Tokyo: Taki University Press, 2014: 106-108.
- [26] 张冬良, 李黎, 钟俊生, 等. 长江口碎波带刀鲚仔稚鱼的形态学研究[J]. 上海海洋大学学报, 2009, 18(2): 2150-2154.
- ZHANG D L, LI L, ZHONG J S, et al. Morphological study on larvae and juveniles of *Coilia nasus* in the surf zone of Yangtze River estuary [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2009, 18(2): 2150-2154.
- [27] KENDALL A W, AHLSTROM E H, MOSER H G. Early life history stages of fishes and their characters [J].

- Ontogeny and Systematics of Fishes, 1984: 11-22.
- [28] NAKAI Z. Studies Relevant to Mechanisms Underlying the Fluctuation in the Catch of the Japanese Sardine, *Sardinops melanosticta* [J]. Japanese Journal of Ichthyology, 1962, 9(6-9): 1-115.
- [29] SCHLITZER R. Ocean Data View [CP/OL]. odv. awi. de, 2024.
- [30] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing [CP/OL]. Computing, 2011, 1: 12-21.
- [31] WICKHAM H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis[EB/OL]. New York: Springer-Verlag, 2016.
- [32] WOOD S N. Generalized Additive Models: An Introduction with R (2nd edition) [EB/OL]. New York: Chapman and Hall/CRC, 2017.
- [33] 刘熠,任鹏,杨习文,等. 长江下游刀鲚(*Coilia nasus*) 仔稚鱼的时空分布[J]. 湖泊科学, 2020, 32(2): 506-517.
- LIU Y, REN P, YANG X W, et al. Spatial and temporal distribution of larvae and juvenile *Coilia nasus* in the lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(2): 506-517.
- [34] 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(4): 40-50.
- WANG J H, SUN Y W, LIU C C, et al. The ichthyoplankton resource investigation in Changjiang Estuary[J]. Journal of Marine Sciences, 2007(4): 40-50.
- [35] 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.
- JIANG M, WANG Y L, SHEN X Q, et al. Distribution characteristics of fish eggs and larvae in Acipensersis Natural Reserve at Changjiang River Estuary[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(2): 288-292.
- [36] 刘守海,王金辉,刘材材,等. 长江口水域夏季鱼卵和仔稚鱼年间变化[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 7190-7197.
- LIU S H, WANG J H, LIU C C, et al. Inter-annual variation in pelagic fish egg, larval, and juvenile assemblages during summer in the Yangtze River Estuary, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): 7190-7197.
- [37] 葛珂珂,钟俊生,吴美琴,等. 长江口沿岸碎波带刀鲚仔稚鱼的数量分布[J]. 中国水产科学, 2009, 16(9): 923-930.
- GE K K, ZHONG J S, WU M Q, et al. Distribution and abundance of larval Japanese grenadier anchovy *Coilia nasus* in the surf zone of the Yangtze River estuary[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(9): 923-930.
- [38] 宋超,李亚鸽,赵峰,等. 长江口刀鲚繁殖群体组成及繁殖性能[J]. 中国水产科学, 2022, 29(7): 951-959.
- SONG C, LI Y G, ZHAO F, et al. Reproductive population composition and reproductive performance of *Coilia nasus* from the Yangtze Estuary [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(7): 951-959.
- [39] 薛向平,彭云鑫,方弟安,等. 长江下游苏通江段刀鲚产卵场的初步研究[J]. 水产学报, 2022, 46(8): 1377-1388.
- XUE X P, PENG W X, FANG D A, et al. Preliminary study of *Coilia nasus* spawning grounds at Sutong section in the lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of fisheries of China, 2022, 46(8): 1377-1388.
- [40] 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.
- 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.
- [41] WANG Y C, WU J H, WANG X F. Predicting the distribution of *Coilia nasus* abundance in the Yangtze River estuary: From interpolation to extrapolation [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2024, 308 (108935).
- [42] 吴海霞. 基于不同物种分布模型的长江口刀鲚栖息地适宜性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- WU H X. Study on the habitat suitability of *Coilia nasus* in the Yangtze River Estuary based on different species distribution models [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [43] 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: 109-111.
- 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: 109-111.
- [44] 郭祉宾,钟俊生,洪波,等. 杭州湾北岸水域仔稚鱼的多样性和聚类分析[J]. 中国水产科学, 2021, 28(11): 1477-1488.
- GUO Z B, ZHONG J S, HONG B, et al. Diversity and cluster analysis of fish larvae and juvenile on the northern of Hangzhou Bay [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(11): 1477-1488.
- [45] 薛利建,周永东,徐开达,等. 舟山近海凤鲚生长参数及资源量、持续渔获量分析[J]. 福建水产, 2011, 33(2): 18-23+32.
- XUE L J, ZHOU Y D, XU K D, et al. Estimation of biological parameter, biomass, sustaining yield for *Coilia*

- mystus in the offshore of Zhoushan[J]. Journal of Fujian Fisheries, 2011, 33(2): 18-23+32.
- [46] 毕雪娟. 长江口凤鲚繁殖生物学及 HSI 评估[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- BI X J. The reproductive biology and preliminary assessment of habitat suitability of *Coilia mystus* in the Yangtze estuary [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [47] 张涛, 王焕焕, 毕学娟, 等. 长江口凤鲚仔稚鱼不同发育阶段矢耳石生长[J]. 中国水产科学, 2017, 24(6): 1315-1322.
- ZHANG T, WANG H H, BI X J, et al. Sagittal otolith growth and development at different development stages in larval and juvenile *Coilia mystus* in the Yangtze estuary [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(6): 1315-1322.
- [48] 杨钧渊, 陈锦辉, 钟俊生, 等. 长江口崇明东滩水域仔稚鱼种类组成及多样性[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(4): 829-840.
- YANG J Y, CHEN J H, ZHONG J S, et al. Species composition and diversity of fish larvae and juveniles in the water area of Chongming Dongtan, Yangtze River Estuary [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(4): 829-840.
- [49] 王东. 长江口凤鲚早期资源分布特征及输运机制的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- WANG D. Study on the Distribution Features and Transport Mechanism of Early Life Stage of *Coilia mystus* in the Yangtze Estuary [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [50] MICHAEL W B, KENNETH L H, KENNETH W A, et al. The Identification, Conservation, and Management of Estuarine and Marine Nurseries for Fish and Invertebrates: A better understanding of the habitats that serve as nurseries for marine species and the factors that create site-specific variability in nursery quality will improve conservation and management of these areas[J]. BioScience, 2001, 51(8): 633 - 641.
- [51] 施永海, 张根玉, 张海明, 等. 刀鲚的全人工繁殖及胚胎发育[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(1): 36-43.
- SHI Y H, ZHANG G Y, ZHANG M H, et al. Complete artificial propagation and embryonic development of *Coilia nasus* [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(1): 36-43.
- [52] DI SANTO V. Ocean acidification and warming affect skeletal mineralization in a marine fish [J]. Proceedings of the Royal Society biological sciences, 2019, 286 (1894): 20182187.
- [53] MA J, LI B, ZHAO J, et al. Environmental influences on the spatio-temporal distribution of *Coilia nasus* in the Yangtze River estuary [J]. Journal of Applied Ichthyology. 2020, 36: 315-325.
- [54] 杨琴, 赵峰, 宋超, 等. 长江口及邻近海域凤鲚生境履历重建[J]. 中国水产科学, 2019, 26(6): 1175-1184.
- YANG Q, ZHAO F, SONG C, et al. Habitat history reconstruction of *Coilia mystus* from the Yangtze River Estuary and its adjacent sea area [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(6): 1175-1184.
- [55] HAJISAMAE S, YEESIN P. Patterns in community structure of trawl catches along coastal area of the South China Sea[J]. The Raffles Bulletin of Zoology, 2010, 58 (2): 357-368.
- [56] 李安东, 钟俊生, 罗一鸣, 等. 长江口南支水域刀鲚仔稚鱼数量变动的研究[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24 (5): 745-753.
- LI A D, ZHONG J S, LUO Y M, et al. Distribution and abundance of *Coilia nasus* larvae and juveniles in the southern branch of Yangtze River Estuary [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(5): 745-753.
- [57] 蒋玫, 李磊, 沈新强, 等. 2010-2011 年长江河口及邻近水域春夏季仔稚鱼群落结构及其多样性的研究[J]. 海洋学报, 2014, 36(6): 131-137.
- JIANG M, LI L, SHEN X Q, et al. Structure of community and biodiversity of larvae fish in spring and autumn 2010-2011 in Yangtze River Estuary and its adjacent waters [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36 (6): 131-137.
- [58] 林军. 基于物种分布模型的长江口仔稚鱼优势种生境特征研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- LIN J. Habitat characteristics of dominant species of fish larvae in the Yangtze estuary based on species distribution model [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.

Distribution of eggs, larvae and juveniles of *Coilia* fish and its relationship with environmental factors in the Yangtze River estuary

ZHAO Dubin^{1,2}, LU Tianyu¹, CHEN Jinhui³, WEI Guangen³, LIU Qiang¹, WANG Xiaodong¹, ZHONG Junsheng¹, LIN Jun⁴

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Research Center for Monitoring and Environmental Sciences, Taihu Basin & East China Sea Ecological Environment Supervision and Administration Authority, Ministry of Ecology and Environment, Shanghai 200125, China; 3. Center for Protection and Research of Aquatic Wild Living Plants and Animals in Shanghai, Shanghai 200092, China; 4. Engineering Technology Research Center of Marine Ranching, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: From July 2022 to May 2023, 30 sampling sites were established in the south branch, north branch, and dongtan of Chongming Island of the Yangtze River estuary to investigate the seasonal distribution of *Coilia nasus*, *Coilia mystus* and their relationships with environmental factors. Field sampling was conducted seasonally using a large larval fish net (mouth diameter: 1.3 m, mesh size: 0.5 mm) for surface horizontal towing, with each tow lasting 10 minutes at a speed of 2 knots. This study aimed to understand the distribution patterns of these two fish species and their responses to seasonal environmental variations in this estuarine ecosystem. The generalized additive model (GAM) was used to analyze the correlation between the abundance of fish larvae and juveniles and environmental factors. The results showed that spring and summer were the main breeding periods for *C. nasus* and *C. mystus* in the Yangtze River estuary. *C. nasus* larvae and juveniles were mainly distributed in the waters near the south branch and the north branch and the dongtan of Chongming Island. In contrast, *C. mystus* eggs were distributed in the waters from Changxing Island to Jiuduansha in the south branch and in the waters outside the entrance to the north branch, while larvae and juveniles were predominantly found outside the south branch, the north branch, and the dongtan of Chongming Island. GAM analysis revealed significant seasonal patterns in the utilization of the Yangtze River estuary as spawning and nursery grounds by both species. Summer had a significant positive effect on the abundance of *C. nasus* larvae and juveniles, while both spring and summer positively influenced the abundance of *C. mystus* larvae and juveniles, with summer showing significantly higher effects than spring ($P < 0.01$). Salinity had a significant impact on the abundance of *C. nasus* ($P < 0.01$). The suitable salinity for *C. nasus* larvae and juveniles was 0–6 PSU. The distribution of *C. mystus* larvae and juveniles was mainly affected by temperature, salinity, and pH ($P < 0.01$). The suitable temperature was 20–32 °C, the suitable salinity was 2–16 PSU, the suitable pH was 7.3–8.2 and the suitable dissolved oxygen ranged from 6.0 to 9.0 mg/L. The interactive effects of environmental factors, temperature-salinity and temperature-pH exhibited significant impacts on the abundance of *C. nasus* larvae and juveniles. Overlapping nursery grounds were observed between the two species, with variations in spatial distribution across different developmental stages. The findings contribute to a better understanding of the ecological dynamics in the Yangtze River estuary and offer guidance for the conservation and management of these two species.

Key words: *Coilia nasus*; *Coilia mystus*; fish larvae and juveniles; spatiotemporal distribution; generalized additive model