

基于最大熵模型的长江口三类生态型仔稚鱼生境分布特征

吴子健¹, 李增光^{1,2,3}, 万 荣^{1,2,3}, 王嘉洛¹, 葛春银¹, 王大元⁴, 赵 欣⁴

1. 上海海洋大学 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306

2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306

3. 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室, 上海 201206

4. 国家能源集团东台海上风电有限责任公司, 江苏 盐城 224200

摘要: 为解析长江口洄游性、海洋性与河口性三类仔稚鱼生境分布的环境驱动因子, 根据 2022 年 9 月 (夏季)、2023 年 4 月 (春季) 长江口仔稚鱼采样数据, 采用最大熵 (Maximum entropy, MaxEnt) 模型分析凤鲚 (*Coilia mystus*, 洄游性)、鳊 (*Engraulis japonicus*, 海洋性) 和香鲈 (*Callionymus olidus*, 河口性) 的生境分布特征及其环境驱动机制。结果表明, 长江口南支的海表面温度、pH、营养盐高于北支, 而北支的海表面盐度、叶绿素高于南支; MaxEnt 模型对这 3 种仔稚鱼生境分布具有较强的预测能力 [曲线下面积 (Area under the curve, AUC) > 0.8], 且春季略优于夏季; 影响凤鲚和香鲈春、夏季生境分布的关键因子均为海表面溶解氧 (相对贡献率分别为 80.8%、86.6% 和 39.8%、30.2%), 而鳊为海表面盐度 (分别为 44.0% 和 79.0%)。不同生态类型仔稚鱼的生境特征及其关键环境因子存在显著差异, 导致其早期生活史阶段的补充过程对环境变化的响应呈现种间特异性。因此, 长江口仔稚鱼资源的保护需针对不同生态类型鱼类的生物学特性及栖息地需求, 制定差异化的保护策略。

关键词: 长江口; 仔稚鱼; 最大熵模型; 生态类型; 生境分布

中图分类号: S 931

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Habitat distribution characteristics of three ecological types of larval fish in Yangtze River Estuary based on Maximum Entropy Model

WU Zijian¹, LI Zengguang^{1,2,3}, WAN Rong^{1,2,3}, WANG Jialuo¹, GE Chunyin¹, WANG Dayuan⁴, ZHAO Xin⁴

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China

3. Key Laboratory of Marine Ecological Monitoring and Restoration Technologies, Ministry of Natural Resources, Shanghai 201206, China

4. National Energy Group Dongtai Offshore Wind Power Co. Ltd., Yancheng 224200, China

Abstract: To investigate the environmental driving factors of habitat distribution for migratory, marine, and estuarine larval fishes in the Yangtze River estuary, based on the larval fish sampling data collected in the Yangtze River Estuary during September 2022 (Summer) and April 2023 (Spring), we applied the Maximum Entropy (MaxEnt) Model to analyze the habitat distribution characteristics and environmental driving mechanisms of *Coilia mystus* (Migratory species), *Engraulis japonicus* (Marine species) and *Callionymus olidus* (Estuarine species). The results reveal that the south branch exhibited higher sea surface temperature (SST), pH (SpH) and nutrient levels (SNITRO), while the north branch showed higher sea surface salinity (SSS) and chloro-

收稿日期: 2025-02-05; 修回日期: 2025-03-26

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD2401305); 国华东台海上风电工程海域生态监测及防生物污损技术研发服务项目

作者简介: 吴子健 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源评估。E-mail: 971663569@qq.com

通信作者: 李增光 (1986—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为渔业生态与资源评估。E-mail: zgli@shou.edu.cn

phyll concentration (SCHL). The MaxEnt model demonstrated strong predictive capability for habitat distribution of these three larval fishes [AUC (Area under the curve) >0.8], with slightly better performance in spring than summer. Sea surface dissolved oxygen was the key factor influencing habitat distribution for both *C. mystus* (Relative contributions: 80.8% in spring and 86.6% in summer) and *C. olidus* (44.0% and 79.0%), whereas sea surface salinity dominated for *E. japonicus* (44.0% and 79.0%). There were significant differences in the habitat characteristics and key environmental factors of larval fish of different ecological types, leading to species-specific responses in their early life history replenishment processes to environmental changes. Therefore, the protection of juvenile fish resources in the Yangtze River Estuary requires development of differentiated protection strategies based on the biological characteristics and habitat needs of different ecological types of fish.

Keywords: Yangtze River Estuary; Larval fish; Maximum Entropy Model; Ecological type; Habitat distribution

长江口作为中国最大的河口, 其所在地域具有众多的人口、复杂的水利设施以及丰富的水环境^[1]。长江口及其临近水域受到多种水系影响, 温、盐度变化大, 营养盐丰富, 饵料生物充足, 是我国海洋渔业十分重要的传统渔场, 也是中华鲟 (*Acipenser sinensis*)、江豚 (*Neophocaena phocaenoides*) 等国家一级重点保护动物的江海洄游唯一通道^[2]。长江口不仅是沿海和河口鱼类的栖息地, 也是降河洄游和溯河洄游鱼类的重要通道, 为大多数能够在河口生存的鱼类提供了产卵和繁殖场所^[3]。长江口及其邻近海域的仔稚鱼种类多达 54 科 100 余种^[4], 是中国多种重要鱼类的“三场一通道”, 对于长江口乃至舟山等邻近海域经济鱼类的补充过程至关重要^[5]。

最大熵 (Maximum entropy, MaxEnt) 模型是一种物种地理尺度空间分布模型, 以最大熵理论为基础构建, 现已在国内外的海洋鱼类研究中得到广泛应用, 如鲹 (*Katsuwonus pelamis*)^[6]、日本鲭 (*Scomber japonicus*)^[7]、黄鲫 (*Setipinna taty*)^[8] 等。然而, 对于长江口鱼类生境的研究更倾向于使用栖息地适宜性指数 (Habitat suitability index, HSI) 模型^[9-11] 和随机森林 (Random forest, RF) 模型^[12-13] 等方法, 对 MaxEnt 模型的应用仍较有限^[14]。相较于其他模型, MaxEnt 模型具有数据量需求少^[15]、预测精度高的优势^[16], 已被广泛应用于仔稚鱼生境研究, 但目前关于长江口不同生态类别仔稚鱼生境分布的 MaxEnt 模型研究尚未见报道。

本研究基于 2022 年 9 月 (夏季) 和 2023 年 4 月 (春季) 长江口水域的仔稚鱼及环境要素调查数据, 选取 3 种典型生态类型代表物种——洄游性凤鲚 (*Coilia mystus*)、海洋性鲹 (*Engraulis japonicus*) 和河口性香鲮 (*Callionymus olidus*), 采用 MaxEnt 模型解析其生境分布特征及其重要影响因子, 以期为

长江口渔业资源管理和海洋生态保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域和站位设计

根据长江口渔业资源分布、重要经济种类产卵场分布特征和长江口地形特点, 确定调查区域, 包括长江口南支和北支等。根据长江口不同的地理特征与盐度状况的差异, 将研究区域分为 A、B、C 和 D 4 个区域 (去除航道附近的站位)。此外, 因考虑航行的困难程度与风险大小, 深水航道不在此次调查的区域内。以崇明岛的中轴线为基准, 将研究区域划分为 159 个 3'×3' 的倾斜栅格。每个航次使用分层随机抽样的方法, 从已有的网格中选择出约 55 个站位。长江口南支水域地形和水文动力环境复杂, 是多种重要经济鱼类及濒危物种的关键栖息地。基于其特殊的生态功能, 本研究在该区域设置了较高比例的采样站位 (占总站位的 54.34%)。各区域设计采样站位数量见表 1。每航次站位根据以上规则设计, 计算机自动生成站位图 (图 1)。

根据以上站位设计, 分别于 2023 年 4 月 (春季) 和 2022 年 9 月 (夏季) 开展 2 个航次的仔稚鱼和相关环境因子调查。

1.2 环境要素测定及样品采集处理

采用大型浮游生物网 (网长 280 cm, 网口内径 80 cm, 网目大小 0.5 mm) 在每个站位以 2~3 n mile 的速度进行表层水平拖网采样, 采样时间为 10 min。滤水体积使用流量计记录, 流量计通过 3 根细绳安装在浮游生物网的网口正中心。利用 SBE 19plusV2 型温盐深测量仪 (Conductivity-temperature-depth system, CTD) 对每个站位的温度、盐度、叶绿素浓度等海洋环境数据进行测定。使用 5% (φ) 的福尔马林海水溶液, 对采集到的鱼类及浮游生物等进行

表1 随机分层各区域设计采样站位数量
Table 1 Number of sampling stations designed for each area

区域 Area	总站位数 Total number of stations	取样站位数 Number of sampling stations	取样站位所占比例 Proportion of sampling stations/%	地理区域 Geographical area
A	33	12	36.36	口内北支 (122°E 以西)
B	46	25	54.34	口内南支 (122°E 以西)
C	42	10	23.81	口外北支 (122°E 以东)
D	38	8	21.05	口外南支 (122°E 以东)
合计 Total	159	55		

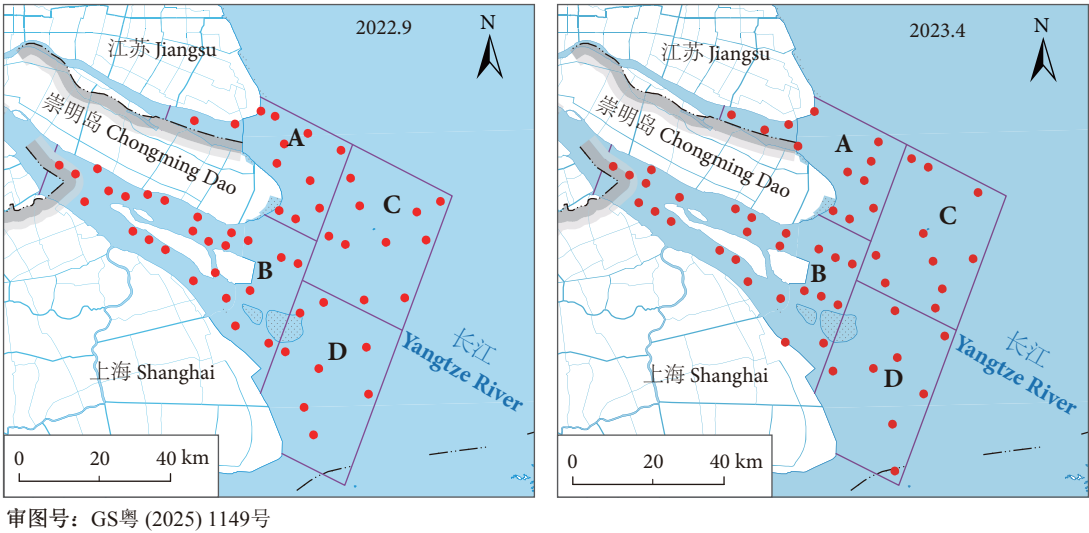


图1 长江口春、夏季采样站位图

Fig. 1 Map of sampling stations in Yangtze River Estuary during spring and summer

固定保存。室内分析处理均按照 GB/T 12763—2007《海洋调查规范》的方法进行。实验室内以形态学方法,参考《中国近海鱼卵与仔鱼》^[17]和《中国近海及其邻近海域鱼卵与仔稚鱼》^[18],使用大型浮游生物计数板在解剖显微镜下进行鉴定。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 数据标准化

用滤水体积对仔稚鱼数量标准化为仔稚鱼密度,其计算公式为:

$$V=k \times D \times S \tag{1}$$

$$\rho=N/V \tag{2}$$

式中: V 为滤水体积 (m^3); k 为流量计系数; D 为起网流量计与下网流量计转数的差值; S 为网口面积; ρ 为鱼卵丰度 ($\text{个} \cdot \text{m}^{-3}$); N 为鱼卵数量 (个)。

1.3.2 优势度分析

根据相对重要性指数 (Index of relative importance, IRI)^[19] 确定不同生态类型的优势物种,其计算公式为:

$$I=(n_i/N) \times f_i \times 10\ 000 \tag{3}$$

式中: I 为相对重要性指数; n_i 为第 i 种个体出现的频率; N 为总个体数目; f_i 为 i 个体出现频率。根据物种分布信息及调查出现站位统计,估算出不同季节下不同物种的优势度 (表 2)。

分析结果表明,海洋种鲢在春、夏季均有较高的优势度,分别为 146.61、342.25;河口种香鲮春、夏季的优势度分别为 48.46、56.78;洄游种凤鲚在夏季优势度远高于其他物种,其优势度为 1 980.65。因此,本研究选择这 3 种生态类别显著差异的仔稚鱼作为研究对象。

1.3.3 MaxEnt 模型

MaxEnt 模型通过物种分布点的环境特征研究环境因子对物种分布的约束条件,估算此约束条件下最大熵的可能分布,并据此推测目标物种的适宜栖息地分布^[20]。本研究采用 MaxEnt v3.4.4 软件构建 MaxEnt 模型,该软件基于 2 组关键数据:一是目标物种在长江口地区的实际地理分布,以 .csv 格式的文件进行存储;二是根据采样点环境数据经插

表2 不同物种春、夏季优势度汇总
Table 2 Summary of index of relative importance of different species in spring and summer

物种 Species	春季 Spring	夏季 Summer	生态类型 Ecological type
鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	146.61	342.25	海洋
凤鲚 <i>Coilia mystus</i>	0.08	1 980.65	洄游
皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belangerii</i>	10.76	223.05	海洋
银鱼 <i>Salanx ariakensis</i>	0.53	9.56	洄游
香鲻 <i>Callionymus olidus</i>	48.46	56.78	河口
弹涂鱼 <i>Periophthalmus modestus</i>	11.69	19.55	河口
大弹涂鱼 <i>Boleophthalmus pectinirostris</i>	0.08	118.18	河口
江口小公鱼 <i>Stolephorus commersonii</i>	895.06	11.59	河口
刀鲚 <i>Coilia ectenes</i>	—	384.54	洄游
小沙丁鱼属 <i>Sardinella</i>	0.05	—	河口

值处理所获的待测区域的环境变量，主要为海表面温度 (Sea surface temperature, SST)、海表面盐度 (Sea surface salinity, SSS)、海表面溶解氧 (Sea surface dissolved oxygen, SO)、海表面叶绿素 (Sea surface chlorophyll, SCHL)、海表面 pH (Sea surface pH, SpH)、海表面营养盐 (Sea surface nutrients, SNI-TRO) 等数据，以 .asc 格式文件储存。

MaxEnt 模型通过计算相对发生率将环境变量的线性组合转换为概率分布，其计算公式^[16]为：

$$P^*(z(x_i)) = \exp(z(x_i)\lambda) / \sum_i \exp(z(x_i)\lambda) \quad (4)$$

式中： z 为 x_i 处环境变量的向量； λ 为回归系数的向量。

MaxEnt 模型参数设置基于 Lisovsky 和 Dudov^[21]

对 MaxEnt 模型的理论框架及操作建议。模型根据存在点数量选择了线性、二次及线性阈值特征组合，同时设定收敛阈值为 0.000 01 以确保模型充分收敛。背景点 (10 000)、迭代次数 (500) 及正则化乘数 β ($\beta=1$) 均采用默认值。为验证模型稳定性，采用 25% 存在点作为独立测试集并执行 10 次重复运算，通过分析训练集与测试集的 AUC 差异及遗漏率识别过拟合风险。通过受试者操作特性曲线 (Receiver operating characteristic curve, ROC) 与曲线下面积 (Area under the curve, AUC) 值评估 MaxEnt 模型的优良程度^[22]。AUC 值是 ROC 曲线下的面积大小，其取值范围为 0~1；当 AUC 值大于 0.9 时，表明预测结果极准确。

2 结果

2.1 环境因子时空分布特征

总体上，春季平均海表面温度、海表面盐度及海表面叶绿素均低于夏季，而春季海表面 pH 和海表面溶解氧高于夏季 (表 3)。使用 Wilcoxon 秩和检验分析环境数据。结果表明，除海表面叶绿素外，其余环境因子季节性差异显著。长江口环境特征在空间上具有显著的异质性 (图 2 和图 3)，南支的海表面温度、海表面 pH 和海表面营养盐较高，而北支的海表面盐度和海表面叶绿素较高。春季海表面叶绿素的空间分布存在明显的梯度变化，且冲淡水舌区域明显高于其他海域，而夏季北支和南支口外较高。海表面盐度在春、夏季均呈现出北支高于南支的分布规律。海表面温度在春季呈近岸高于远岸的空间分布模式，而夏季则是南支高于北支。

表3 长江口环境因子分布范围及平均值
Table 3 Distribution range and average value of environmental factors in Yangtze River Estuary

环境因子 Environmental factor	春季范围 Range of spring	春季平均值 Average value of spring	夏季范围 Range of summer	夏季平均值 Average value of summer
海表面温度 SST/℃	6.31~25.45	16.48	22.16~24.98	23.64
海表面盐度 SSS/‰	0.01~24.71	10.22	0.01~34.53	14.30
海表面叶绿素 SCHL/(mg·m ⁻³)	0.14~1.28	0.75	0.30~1.54	0.82
海表面 pH SpH	8.15~9.03	8.59	7.83~8.48	8.20
海表面溶解氧 SO/(mg·L ⁻¹)	7.35~7.44	7.41	5.34~7.47	6.16
海表面营养盐 SNI-TRO/(mg·L ⁻¹)	14.12~15.55	14.90	—	—

2.2 生境分布特征

MaxEnt 模型对凤鲚、鳀、香鲻 3 种仔稚鱼适

宜生境分布具有较强的预测能力，总体上对春季的预测略优于夏季，除春季鳀 AUC 值为 0.871 外，

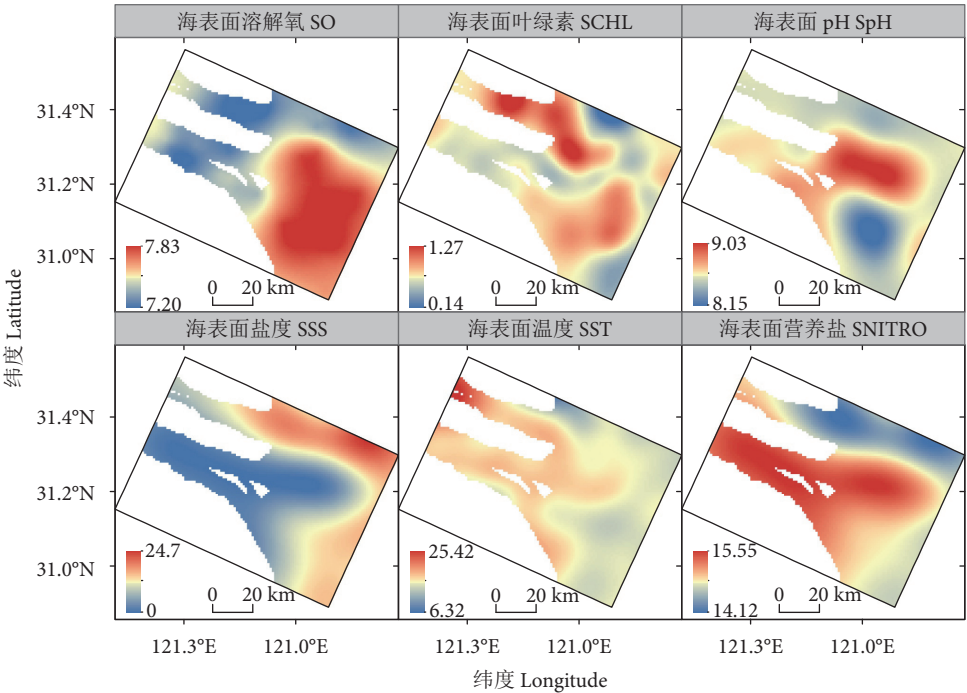


图2 春季长江口环境分布特征

Fig. 2 Spring distribution of environmental factors in Yangtze River Estuary

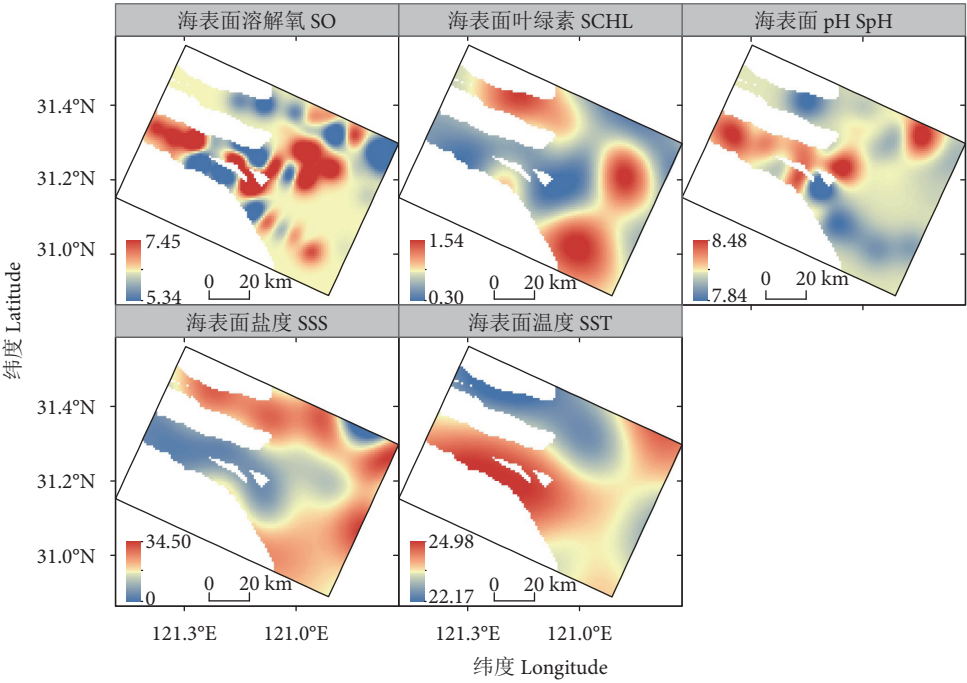


图3 夏季长江口环境分布特征

Fig. 3 Summer distribution of environmental factors in Yangtze River Estuary

其余均大于 0.9(表 4)。根据 MaxEnt 模型对 3 种鱼类春、夏季的适宜生境分布特征的预测结果见图 4。

夏季，凤鲚和鲢的适宜生境分布均较为分散，呈斑块状分布。其中，凤鲚适宜生境分布较广，在南支、崇明浅滩及北支口外均有分布；鲢主要分布于北支及外侧高盐水域；香鲈主要分布于长江口南

表4 各物种春、夏两季 AUC 值		
Table 4 AUC values of each species in spring and summer		
物种 Species	春季 AUC 值 AUC value in spring	夏季 AUC 值 AUC value in summer
凤鲚 <i>C. mystus</i>	0.940	0.933
鲢 <i>E. japonicus</i>	0.981	0.871
香鲈 <i>C. olidus</i>	0.940	0.936

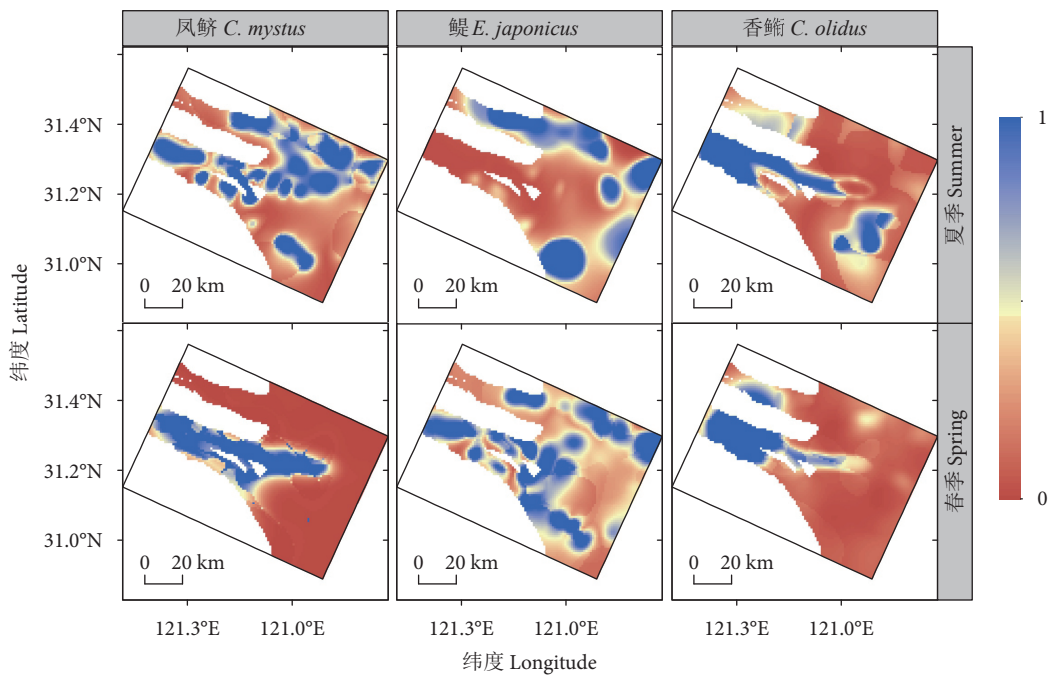


图4 鱼类栖息地适宜区分布
Fig. 4 Fish habitat suitable area distribution

支及口外区域。3 种鱼类在春季的适宜生境分布均较集中, 尤其是凤鲚和香鲮, 主要集中在南支。总体而言, 凤鲚和鳊的适宜生境分布具有显著的季节性变化。

2.3 生境分布与环境因子的关系

春、夏两季主要环境变量对 MaxEnt 模型预测

不同物种分布的相对贡献率见表 5。海表面溶解氧是影响凤鲚、香鲮生境分布的关键环境因子。在春、夏季的 MaxEnt 模型结果中, 凤鲚的海表面溶解氧相对贡献率分别为 80.8%、86.6%; 香鲮则分别为 39.8%、30.2%。鳊在春、夏季贡献率最高的环境因子均为海表面盐度 (44.0%、79.0%)。

表5 各环境因子对 MaxEnt 模型的相对贡献率
Table 5 Relative contribution rates of environmental variables to MaxEnt Model

环境变量 Environment variable	凤鲚 <i>C. mystus</i>		鳊 <i>E. japonicus</i>		香鲮 <i>C. olidus</i>	
	夏季 Spring	春季 Summer	夏季 Spring	春季 Summer	夏季 Spring	春季 Summer
海表面溶解氧 SO/(mg·L ⁻¹)	86.6	80.8	4.6	0.1	30.2	39.8
海表面叶绿素 SCHL/(mg·m ⁻³)	7.2	5.3	16.3	1.6	24.7	6.0
海表面 pH SpH	5.8	3.8	0.1	2.7	27.5	11.4
海表面盐度 SSS/‰	0.3	8.9	79.0	44.0	17.5	34.2
海表面温度 SST/℃	0	0.6	0	8.4	0	0
海表面营养盐 SNITRO/(mg·L ⁻¹)	—	0.6	—	43.2	—	8.6

3 讨论

3.1 长江口环境因子时空分布特征

长江口的环境因子 (如温度、盐度、溶解氧和叶绿素 *a*) 不仅存在显著的季节性差异, 同时表现出一定的空间异质性。从季节变化上看, 春季平均海表面温度低于夏季, 这是由于夏季太阳辐射强烈, 对表层海水的增温作用明显 [23]。春季平均海表面盐度也低于夏季。同时, 南支的咸潮入侵和北

支的咸潮倒灌受到各汊道河床、径流、潮流等多种因素的影响, 导致长江口的盐度呈现复杂的波动 [24]。夏季平均海表面叶绿素也高于春季, 浮游植物的生长受到温度、溶解氧和营养盐多种环境因子的影响 [25]。夏季长江径流量增加, 使受长江径流影响区域的营养盐含量上升, 从而导致浮游植物生物量增加。

从空间分布上看, 长江口南支与北支的环境因

子表现出显著的空间异质性。本研究中,春、夏季海表面盐度分布均呈现南支低于北支的特征,这主要因为南支作为长江主要入海通道,受大量冲淡水影响导致盐度降低^[26]。春季海表面温度呈现南、北支口内高于南、北支口外的分布格局。而夏季海表面温度则表现出与海表面盐度相反的特征,即南支高于北支,这可能源于夏季长江径流量增加,大量淡水输入南支导致水温上升^[23]。海表面叶绿素和溶解氧的空间分布同样存在明显梯度变化:春季冲淡水舌区域的海表面叶绿素浓度明显高于其他海域,而夏季北支和南支口外较高;春季海表面溶解氧则表现为南、北支及北支口外低于南支口外。

3.2 仔稚鱼生境分布及影响因素分析

长江口复杂的环境特征,特别是咸淡水混合而导致的盐度变化,为不同生态位需求的鱼类提供了适宜的产卵和育幼场所^[27-28]。长江口全年均有仔稚鱼分布,但主要集中在春、夏两季。多数鱼类的产卵高峰期集中在4—6月^[29],这直接导致春季仔稚鱼密度较大,而夏季仔稚鱼数量分布范围更广。

本研究结果显示,仔稚鱼的最适生境呈现明显的季节性变化,且不同生态类型仔稚鱼的最适生境空间分布存在差异。凤鲚是典型的河口洄游性鱼类,春季其性成熟个体迁移到咸水河口水域甚至淡水区域产卵^[30]。历史研究表明,其产卵场主要分布于长江口南支^[31-32],而育幼场则位于长江口北支口门及崇明东滩^[33],这与本研究结果一致。鲢的适宜生境在春季主要分布于南支、南支口外和北支口外水域,鳊在南支低盐度区域的生境分布可能源于海水倒灌及南支盐水入侵等导致的河口生境变化^[34-35]。香鲇作为河口性鱼类,其繁殖期集中在4—6月。目前关于香鲇在长江口生境分布研究尚未见报道。本研究发现,香鲇偏好分布于高温、低盐环境,且其适宜生境的季节性变化相对较小:春季主要栖息于南支河口内,北支口内有少量分布;夏季则主要分布于南支及南支口外区域。综合分析显示,3种生态类型仔稚鱼的共同生境主要集中于南支(低盐度区)和南支口外(咸淡水混合区),说明南支水域的仔稚鱼生境适宜性较北支更为复杂,也提示了长江咸淡水混合过程对多种生态类型仔稚鱼栖息地选择的重要调控作用。

本研究选取的3种仔稚鱼分别属于洄游性、海洋性和河口性鱼类,不同功能群的仔稚鱼在生境特征和最适环境因子上存在差异^[36]。凤鲚在春、夏

季的主要影响因子均为海表面溶解氧,其相对贡献率分别为80.8%、86.6%,这一结果与已有的研究结论一致^[37]。此外,珠江口的相关研究表明,凤鲚的分布还受到盐度和温度的影响^[38]。盐度是河口鱼类群落结构时空差异的关键环境因子^[39-41],也是影响鳊生境分布的关键环境因子^[42]。本研究结果显示,鳊的生境分布在夏季主要受海表面盐度的影响(79.0%),春季则同时受到海表面盐度和海表面营养盐的影响,且两者的影响程度相似(44.0%和43.2%)。由于夏季海表面营养盐有效数据仅覆盖20个站位(设备故障所致),为确保模型可靠性,夏季MaxEnt模型未纳入该参数,因此在讨论中未对营养盐影响的季节差异进行分析。香鲇的生境分布特征表现为:夏季主要受海表面溶解氧和海表面pH的影响(30.2%和27.5%),春季则主要受海表面溶解氧和海表面盐度的影响(39.8%和34.2%)。不同生态类型仔稚鱼的生境特征及其关键环境驱动因子存在显著差异,这种差异导致其早期生活史阶段的补充过程对环境变化的响应呈现种间特异性。其中,海表面溶解氧是影响洄游种和河口种的关键环境因子,当其质量浓度低于 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的临界阈值时,将显著抑制鱼类生长^[43]。尽管本研究的环境监测数据显示长江口海表面溶解氧质量浓度均大于 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但仍需警惕该区域因有机质矿化耗氧导致的季节性缺氧现象^[44]。谢雯等^[45]研究发现,长江口潮滩湿地修复区的溶解氧浓度较自然对照区显著提升($p<0.05$),其鱼类幼体丰度较对照区增加37.2%,证实了溶解氧水平对鱼类早期资源补充的关键调控作用。因此,在开展洄游种和河口种仔稚鱼的生境修复工程时,应重点关注长江口海表面溶解氧的季节性变化,通过增强水体复氧能力来维持适宜的溶解氧时空分布格局。

长江口作为我国重要的鱼类育幼场,其仔稚鱼群落结构特征及生境选择机制已成为水生生态学研究热点。本研究结果表明,由于不同生态类型仔稚鱼对栖息环境的差异化选择,长江口仔稚鱼资源的保护可能不存在单一的保护策略。需要指出的是,本研究主要基于表层海水温度、盐度等环境参数进行建模分析,尚未整合水动力特征、底层盐度梯度及底质类型等环境要素。未来可通过更多维度环境因子的耦合分析,进一步深化对仔稚鱼栖息地选择机制的理解,从而提升仔稚鱼资源保护策略的生态适宜性。

参考文献:

- [1] 张建坤, 杨红, 王春峰, 等. 长江口中华鲟保护区附近海域重金属分布特征及生态风险评价[J]. *上海海洋大学学报*, 2020, 29(5): 720-733.
- [2] 全为民, 沈新强. 长江口及邻近水域渔业环境质量的现状及变化趋势研究[J]. *海洋渔业*, 2004, 26(2): 93-98.
- [3] 胡艳. 长江口近岸水域幼鱼时空分布及代表种资源评估[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015: 28.
- [4] 庄平. 长江口鱼类[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2006: 157-160.
- [5] 李晓伟, 赵建民, 刘辉, 等. 渤海黄渔业资源三场一通道现状、问题及优化管理政策[J]. *海洋湖沼通报*, 2018(5): 147-157.
- [6] 汪伟松, 唐未, 龚一赫, 等. 基于 MaxEnt 模型模拟中西太平洋鲉自由鱼群栖息地的研究[J]. *南方水产科学*, 2023, 19(5): 11-21.
- [7] 曹睿星, 官文江, 高峰, 等. 基于最大熵和栖息地指数模型预测东、黄海日本鲭渔场分布[J]. *海洋学报*, 2023, 45(9): 72-81.
- [8] 李齐群, 蒋日进, 赵凡, 等. 基于 MaxEnt 模型的浙江近岸黄鲫潜在适生区分布研究[J]. *中国水产科学*, 2025, 32(1): 93-102.
- [9] XUE S F, SUN T, ZHANG H, et al. Suitable habitat mapping in the Yangtze River Estuary influenced by land reclamations[J]. *Ecol Eng*, 2016, 97: 64-73.
- [10] 佟佳琦, 陈锦辉, 高春霞, 等. 基于栖息地适应性指数的长江口刀鲚时空分布特征[J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(4): 584-593.
- [11] 杨红, 丁骏, 王春峰, 等. 长江口中华鲟幼鲟栖息地适宜性评价[J]. *海洋通报*, 2012, 31(6): 675-679.
- [12] 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: 17-18.
- [13] WAN R, SONG P B, LI Z G, et al. Use of ensemble model for modeling the larval fish habitats of different ecological guilds in the Yangtze Estuary[J]. *Fishes-Basel*, 2023, 8(4): 209.
- [14] HE Y L, ZHAO L X, LIU S H, et al. Delineation of estuarine ecological corridors using the MaxEnt model to protect marine fishery biodiversity[J]. *Front Mar Sci*, 2022, 9: 966621.
- [15] 杨佳悦, 丁国玉, 田秀君. 最大熵模型在物种生境预测中的应用研究进展[J]. *应用生态学报*, 2025, 36(2): 614-624.
- [16] 薛嘉伦, 樊伟, 唐峰华, 等. 基于最大熵模型预测西北太平洋公海鲈潜在栖息地分布[J]. *南方水产科学*, 2018, 14(1): 92-98.
- [17] 赵传綯, 张仁斋. 中国近海鱼卵与仔鱼[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 1-206.
- [18] 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: 1-435.
- [19] PIANKA E R. Lizard species density in the Kalahari Desert[J]. *Ecology*, 1971, 52(6): 1024-1029.
- [20] 吴庆明, 王磊, 朱瑞萍, 等. 基于 MAXENT 模型的丹顶鹤营巢生境适宜性分析: 以扎龙保护区为例[J]. *生态学报*, 2016, 36(12): 3758-3764.
- [21] LISSOVSKY A A, DUDOV S V. Species-distribution modeling: advantages and limitations of its application. 2. MaxEnt[J]. *Biol Bull Rev*, 2021, 11(3): 265-275.
- [22] CARLOS-JÚNIOR L A, NEVES D M, BARBOSA N P, et al. Occurrence of an invasive coral in the southwest Atlantic and comparison with a congener suggest potential niche expansion[J]. *Ecol Evol*, 2015, 5(11): 2162-2171.
- [23] 买佳阳, 蒋雪中. 2000 年以来长江河口海表温度变化 MODIS 分析[J]. *遥感学报*, 2015, 19(5): 818-826.
- [24] 施思, 骆政, 徐昕. 2018 年长江口枯季盐度监测与分析[J]. *水利水电快报*, 2021, 42(10): 75-80, 87.
- [25] 高磊, 姚海燕, 曹婧, 等. 漆河口邻近海域夏季海水叶绿素 a 时空分布特征及其影响因素[J]. *海洋湖沼通报*, 2017(5): 109-113.
- [26] 孔亚珍, 贺松林, 丁平兴, 等. 长江口盐度的时空变化特征及其指示意义[J]. *海洋学报*, 2004, 26(4): 9-18.
- [27] WHITFIELD A K. Why are there so few freshwater fish species in most estuaries?[J]. *J Fish Biol*, 2015, 86(4): 1227-1250.
- [28] WHITFIELD A K. The role of seagrass meadows, mangrove forests, salt marshes and reed beds as nursery areas and food sources for fishes in estuaries[J]. *Rev Fish Biol Fisher*, 2017, 27(1): 75-110.
- [29] 农牧渔业部水产局. 东海区渔业资源调查和区划[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1987: 216-622.
- [30] HE W P, LI Z J, LIU J S, et al. Validation of a method of estimating age, modelling growth, and describing the age composition of *Coilia mystus* from the Yangtze Estuary, China[J]. *ICES J Mar Sci*, 2008, 65(9): 1655-1661.
- [31] 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.
- [32] WANG D, WAN R, LI Z G, et al. The non-stationary environmental effects on spawning habitat of fish in estuaries: a case study of *Coilia mystus* in the Yangtze Estuary[J]. *Front Mar Sci*, 2021, 8: 766616.
- [33] 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: 36-38.
- [34] 朱宜平. 长江口青草沙水域外海正面盐入侵特点分析[J]. *华东师范大学学报 (自然科学版)*, 2021(2): 21-29.
- [35] ISEKI K, KIYOMOTO Y. Distribution and settling of Japanese anchovy (*Engraulis japonicas*) eggs at the spawning ground off Changjiang River in the East China Sea[J]. *Fish Oceanogr*, 1997, 6(3): 205-210.
- [36] 线薇薇, 张辉, 刘淑德. 河口鱼类浮游生物生态学研究进展[J]. *海洋科学集刊*, 2016, 51(23): 167-180.
- [37] 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.
- [38] 谢雨芳, 吴鹏, 刘永, 等. 珠江河口凤鲚的栖息地适宜性评价[J]. *南方水产科学*, 2023, 19(1): 22-29.
- [39] XIA M X, JIA H, WANG Y B, et al. Effects of climate change on the distribution of *Scomber japonicus* and *Konosirus punctatus* in China's coastal and adjacent waters[J]. *Fishes*, 2024, 9(10): 395.
- [40] ZHANG H, XIAN W W, LIU S D. Ichthyoplankton assemblage structure of springs in the Yangtze Estuary revealed by biological and environmental visions[J]. *PeerJ*, 2015, 3: e1186.
- [41] ZHANG H, XIAN W W, LIU S D. Autumn ichthyoplankton assemblage in the Yangtze Estuary shaped by environmental factors[J]. *PeerJ*, 2016, 4: e1922.
- [42] 柳昊, 张文超, 李文甲, 等. 黄海中部夏季鲈鱼卵、仔稚鱼分布与早期生长特征[J]. *上海海洋大学学报*, 2024, 33(1): 172-185.
- [43] 余欣欣, 郑国栋, 陈杰, 等. 低氧胁迫对鱼类影响的研究进展[J]. *水产科学*, 2024, 43(2): 333-340.
- [44] 李晓瑛, 王华, 王屹晴, 等. 基于机器学习的长江口溶解氧预测模型与评估[J]. *环境科学*, 2024, 45(12): 7123-7133.
- [45] 谢雯, 王思凯, 秦泽, 等. 长江口潮滩湿地生境修复对鱼类群落结构的影响[J]. *中国水产科学*, 2023, 30(5): 573-583.