

DOI: 10.12264/JFSC2025-0014

浙江近海鲢栖息地适宜性研究

申家荣^{1,2}, 蒋日进^{2*}, 崔明远², 印瑞², 张洪亮², 李齐群^{1,2}, 张玉荣³

1. 浙江海洋大学海洋与渔业研究所, 浙江 舟山 316021;
2. 浙江省海洋水产研究所, 农业农村部重点渔场渔业资源科学观测实验站, 浙江省海洋渔业资源可持续利用技术研究重点实验室, 浙江 舟山 316021;
3. 浙江万里学院, 浙江 宁波 315300

摘要: 鲢(*Miichthys miiuy*)是浙江近海主要的经济鱼类之一。为了解浙江近海鲢栖息地分布与环境因子的关系, 本研究根据 2022 年 4 月(春季)、7 月(夏季)、11 月(秋季)和 2023 年 2 月(冬季)在浙江近海开展的渔业资源调查数据和同步采集的环境数据, 构建了浙江近海鲢对重要环境因子的适宜性指数(suitability index, SI)曲线, 通过提升回归树(BRT)估算各环境因子的权重, 进而利用算术平均法(arithmetic mean model, AMM)和几何平均法(geometric mean model, GMM)分别构建栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI)模型。结果表明: 2022—2023 年浙江近海鲢栖息地存在季节性差异。春夏两季, 鲢最适栖息于底层盐度范围为 26.4~32.1 的近岸水域; 秋季, 鲢最适栖息地向离岸侧移动, 最适栖息于 21~44 m 的近海岛礁水域; 冬季, 鲢最适栖息于底层温度为 11.0~14.1 °C 的近海深水区。浙江近海鲢栖息地时空分布的差异主要受环境因子和鲢生活习性的影响。

关键词: 鲢; 栖息地适宜性指数; 环境因子; 提升回归树

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)07-0960-10

鲢(*Miichthys miiuy*)隶属鲈形目(Perciformes)石首鱼科(Sciaenidae)鲢属(*Miichthys*), 又称米鱼、黑鲢, 广泛分布于西北太平洋地区, 系近海暖温性底层鱼类, 适温适盐广, 食量大, 以鱼、虾为主要饵料, 春季由深水向近岸作生殖洄游, 冬季回到深水区越冬^[1]。鲢肉质鲜美, 药用价值极高^[2], 是浙江省主要经济鱼类之一, 总产量占全国 60% 以上^[3]。迄今, 国内外专家学者有关鲢的研究报道主要围绕年龄和生长^[4]、资源密度分布^[5-6]、早期发育^[7-8]、形态特征^[9]、人工杂交^[10]、分子机制调控^[11]、遗传多样性^[12-13]等领域, 而对鲢栖息地适宜性的研究报道较少。受连续多年的高强度捕捞、气候变化和生境破坏等因素影响, 我国近海底层经济鱼类资源受损严重, 鲢栖息地空间也面临萎

缩的态势。因此, 亟须在浙江近海开展鲢栖息地适宜性等方面的研究, 掌握鲢栖息地的时空分布规律, 阐明海洋环境对鲢时空分布的影响。

栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI)模型最早由美国渔业与野生动物局提出, 是评估野生生物对栖息地生境因子偏好程度的重要工具, 目前在生物空间分布、渔业资源评估和渔情预报等领域得到广泛应用^[14]。研究者构建 HSI 模型时通常默认各环境变量权重相等, 然而, 不同环境因子对生物分布的影响存在差异。已有研究证明, 使用提升回归树(BRT)模型为各环境因子加权后的 HSI 模型对生物适宜栖息地的预测性能更优^[15-16], 并且基于不同算法构建的 HSI 模型的预测效果也存在差异^[17]。

收稿日期: 2024-02-13; 修订日期: 2025-03-17.

基金项目: 浙江省“三农九方”科技协作计划项目(2025SNJF094); 浙江省海洋经济发展厅渔业资源调查专项(HYS-CZ-202505, HYS-CZ-202408, HYS-CZ-202502).

作者简介: 申家荣(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源生态学. E-mail: sdrzshenjiarong@163.com

通信作者: 蒋日进, 高级工程师, 研究方向为渔业资源生态学. E-mail: jiangridge@163.com

浙江近海海域岛屿众多, 长期受浙江沿岸流、台湾暖流以及近岸冲淡水影响, 底质类型多样, 海水营养盐丰富, 是包括鳁在内众多经济鱼类理想的产卵、索饵场^[18]。鳁在浙江近海分布广泛, 与大部分经济种类在春季产卵不同, 其繁殖高峰期在夏秋季, 迄今尚无鳁在近海分布适宜性方面的研究, 为了探究多种环境因子对鳁资源分布的影响, 本研究根据 2022 年 4 月(春季)、7 月(夏季)、11 月(秋季)和 2023 年 2 月(冬季)在浙江近海开展的鳁渔业资源调查监测数据, 构建 HSI 模型, 分析浙江近海鳁栖息地适宜性, 旨在为浙江近海鳁资源的养护及管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据来源于 2022 年 4、7、11 月和 2023 年 2 月共计 4 个月份的浙江近海渔业资源底拖网调查, 调查站位分布情况如图 1 所示。调查船为单船底拖网渔船, 船长 38 m, 总吨位 150 t, 调查网具为底拖网, 网口拉紧周长 50 m, 调查船拖速为 3 n mile/h, 各调查位点拖网时间均为 30 min, 随机在每个调查位点取渔获物 1 箱(约 20 kg), 不足 1 箱的全

部取回, 待运回实验室后进行渔获鉴定、分类和生物学测量。数据分析和建模前进行拖速 3 n mile/h 和拖曳时间 1 h 的标准化处理, 并使用单位时间渔获尾数(ind/h)来指代鳁资源密度的变化情况。

每个调查位点使用加拿大 RBR 多参数水质仪同步采集海水盐度、温度、溶解氧浓度、深度、浑浊度、导电率、酸碱度、叶绿素浓度等数据, 鳁为近海暖温性底层鱼类, 主要生活在底层水域, 选用底层数据进行后续分析。由于环境数据有时会受到测量误差和特殊事件的影响而出现异常值, 为确保分析结果的可靠性, 研究使用四分位距法(IQR)识别并去除环境数据中的异常值^[19], IQR 敏感度倍数设置为 2。建模前对各环境因子进行 Pearson 相关性检验, 共线性强($|r| > 0.8$)的两个环境因子仅选取一个保留, 最终选择的环境因子为底层盐度(bottom salinity, BS)、底层温度(bottom temperature, BT, °C)、深度(depth, m)和底层溶解氧浓度(bottom dissolved oxygen, BDO, mg/L)。本研究中 IQR 的计算和 Pearson 相关性检验均在 R 4.3.3 中实现。

1.2 环境因子适宜性曲线的构建

1.2.1 适宜性指数计算 构建基于单位时间渔获尾数(ind/h)的适宜性指数(suitability index, SI), 然后使用平滑函数拟合 SI 与各季节底层盐度、底层温度、底层溶解氧浓度和深度的单因子适宜性指数曲线。SI 的取值范围是 0~1, SI 值越大, 表示适宜性指数越高, $SI \geq 0.7$ 为鳁的适宜生存环境^[20]。SI 计算公式为:

$$SI = \frac{\hat{A} - \hat{A}_{\min}}{\hat{A}_{\max} - \hat{A}_{\min}} \quad (2)$$

式中, $\hat{A}$ 为平滑回归后的尾数资源密度, $\hat{A}_{\min}$ 为尾数资源密度预测值的最小值, $\hat{A}_{\max}$ 为尾数资源密度预测值的最大值。

1.2.2 环境因子权重的赋值 提升回归树(boosted regression tree, BRT)模型通过计算不同环境因子在总模型偏差中的相对贡献率来确定各环境因子权重^[21]。提升算法将回归树(regression tree)和提升(boosting)两种方法结合起来, 通过调整学习率(learning rate, LR)和树的复杂度(tree complexity, TC)对 BRT 进行优化, 并根据简单树(simple tree)的迭代拟合来提高预测结果的可靠性。本文 BRT

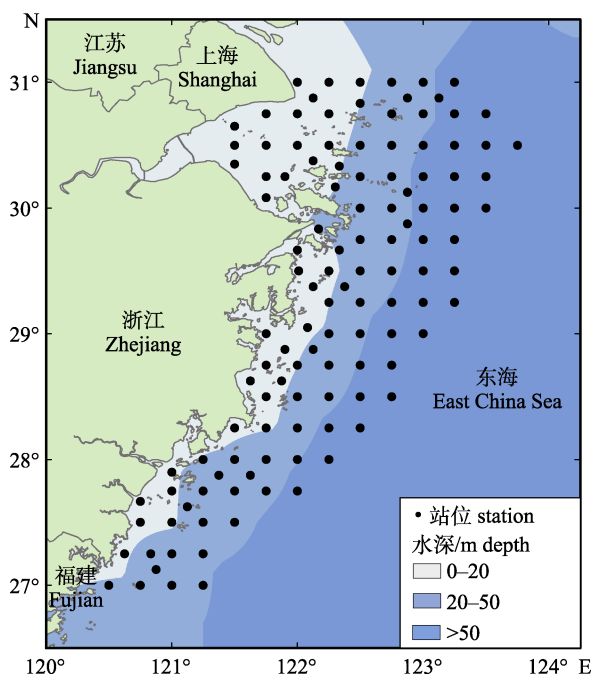


图 1 渔业资源调查站位分布图

Fig. 1 Station distribution of fishery resource survey

模型的运算通过 R 4.3.3 gbm 包实现。

1.2.3 栖息地适宜性指数模型的构建 栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI)是由各个环境变量的适宜性指数 SI, 通过一定计算方法用来描述生物栖息地适宜性的数值指标。计算方法的选择对评估 HSI 模型的预测能力具有决定性作用, 每种计算方法都有其独特的优势和局限性^[18], 在各环境因子被 BRT 模型赋予相应权重后, 本研究采用在渔业领域应用广泛的算术平均法(AMM)和几何平均法(GMM)构建 HSI 模型, AMM 算法通常可以获得比较稳定的结果, 而 GMM 算法则对极值表现出较高的敏感性^[22-23]。

本研究将 $HSI \geq 0.7$ 的水域定义为鳊的最适栖息地, $0.7 > HSI \geq 0.3$ 的水域定义为鳊的可栖息地, $HSI < 0.3$ 的水域定义为鳊的不适宜栖息地^[24]。HSI 计算公式为:

$$HSI_{AMM} = \frac{\sum_{i=1}^n SI_i \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (2)$$

$$HSI_{GMM} = \left(\prod_{i=1}^n SI_i^{\omega_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \omega_i}} \quad (3)$$

式中, HSI_{AMM} 为赋予权重的 AMM 算法计算得出的 HSI, HSI_{GMM} 为赋予权重的 GMM 算法计算得出的 HSI; SI_i 为环境变量 i 的 SI 值; ω_i 为环境变量 i 的权重; n 为环境因子数量。

1.3 模型预测性能的检验

通过对各季节不同算法构建的 HSI 模型进行交叉验证来检验模型可靠性, 本研究中随机选取 80% 的数据用于模型的构建, 剩余 20% 数据用于检验过程, 检验过程重复进行 100 次。使用赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)对四个季节中不同算法构建的 HSI 模型进行预测性能检验, 通常, AIC 值越小预测性能越可靠。

1.4 绘制 HSI 值分布图

基于各季节最适 HSI 模型计算各站位 HSI 值, 利用 ArcGIS 10.8 软件中克里金插值法绘制研究水域中鳊栖息地适宜性分布图, 并计算最适栖息地在研究水域中所占比例^[25]。

2 结果与分析

2.1 环境因子适宜性曲线

通过拟合不同环境因子的 SI 值, 得到单个环境因子的适宜性指数曲线(图 2), 结果显示, 鳊四季栖息的底层盐度、温度、深度和溶解氧浓度范围较为广泛, 依次为 26.4~34.1、11.0~28.1 °C、14~60 m、5.8~9.6 mg/L, 不同季节各环境因子的适宜范围($SI \geq 0.7$, 下同)存在差异(表 1)。

2.2 环境因子的权重

利用 BRT 模型对不同季节鳊栖息地的环境要素分别赋予权重(图 3), 每一个环境变量的权重由各环境因子对 BRT 模型总方差的贡献率来确定。底层溶解氧在各季节中对鳊栖息地分布的影响最小, 而底层盐度、底层温度和深度分别在不同季节中对鳊栖息地分布起到了重要的作用。春季底层盐度对总偏差贡献率最大, 为 46.7%。夏季底层盐度对总偏差贡献率最大, 高达 69.4%。秋季深度对总偏差贡献率最大, 为 42.8%。冬季底层温度对总偏差贡献率最大, 为 45.8%。

2.3 HSI 模型的比较和检验

利用交叉验证对不同模型的预测性能进行评估。结果显示, 经 BRT 加权后的 HSI 模型具有较大的 R^2 和较小的 AIC 值, 并且基于不同算法构建的 HSI 模型在不同季节的预测性能表现不同(表 2)。春季、夏季和冬季, 运用 AMM 算法且赋予权重的 HSI 模型预测结果更准确; 而秋季, 运用 GMM 算法且赋予权重的 HSI 模型预测性能最优。

2.4 鳊的最适栖息地分布

各季节最优模型显示, 浙江近岸鳊最适栖息地分布存在明显季节性差异(图 4)。春季鳊最适栖息地($HSI \geq 0.7$)主要分布于舟山渔场以及洞头列岛周边海域, 其中舟山渔场的最适栖息地分布范围更广, 适宜性指数更高。夏季鳊最适栖息地范围有所扩大, 主要分布在河口区域, 其中, 杭州湾与长江口交汇区的最适栖息地分布范围更广, 适宜性指数较三门湾和瓯江口更高。秋季鳊最适栖息地向河口外侧的水域移动, 高 HSI 海域平行于 20 m 和 40 m 等深线。冬季鳊最适栖息地向东北方向移动, 集中分布在 123°E~124°E 之间, 呈

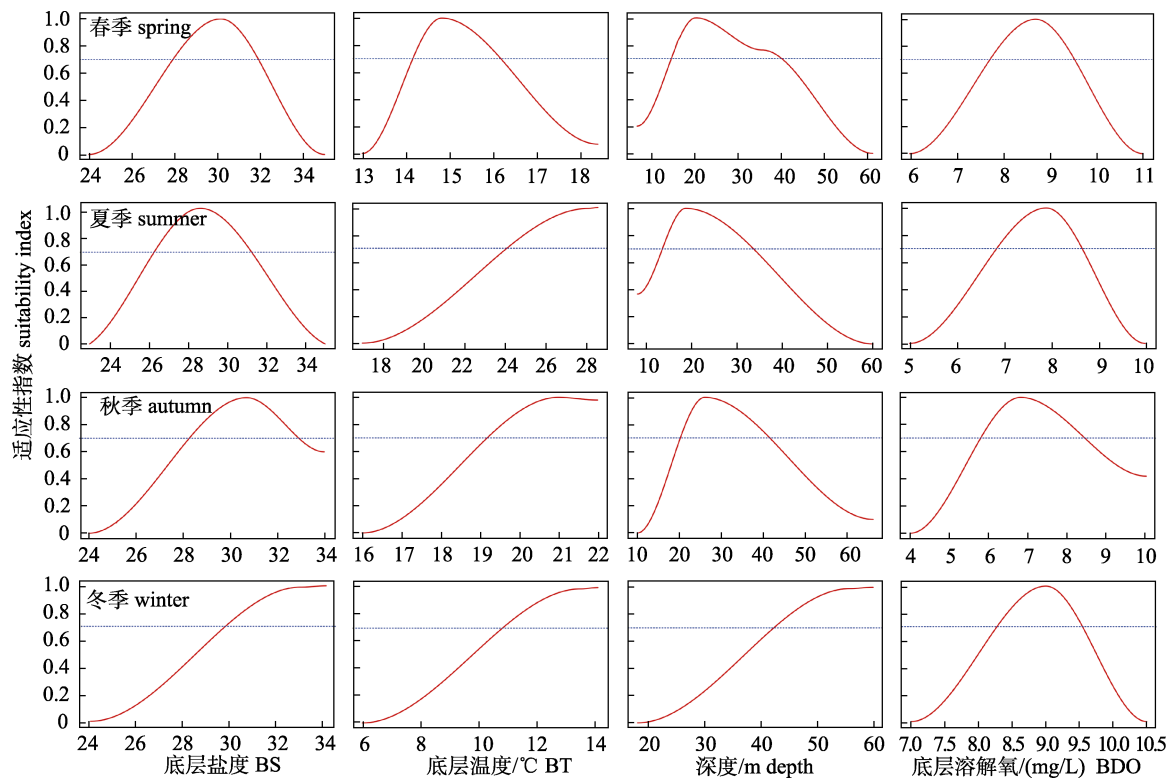


图 2 鲢对不同环境因子的适宜性曲线

Fig. 2 Suitability index curves of *Miichthys miiuy* to different environmental factors

表 1 不同季节鲢对 4 种环境因子的最适范围

Tab. 1 The most suitable range of four environmental factors for <i>Miichthys miiuy</i> by season				
季节 season	最适底层盐度 suitable bottom salinity	最适底层温度/℃ suitable bottom temperature	最适深度/m suitable depth	最适底层溶解氧浓度/(mg/L) suitable bottom dissolved oxygen concentration
春季 spring	28.0–32.1	14.2–16.3	16–41	7.8–9.5
夏季 summer	26.4–31.5	24.8–28.1	14–35	6.9–8.7
秋季 autumn	28.4–33.1	19.2–24.2	21–44	5.8–8.4
冬季 winter	30.0–34.1	11.0–14.1	43–60	8.3–9.6

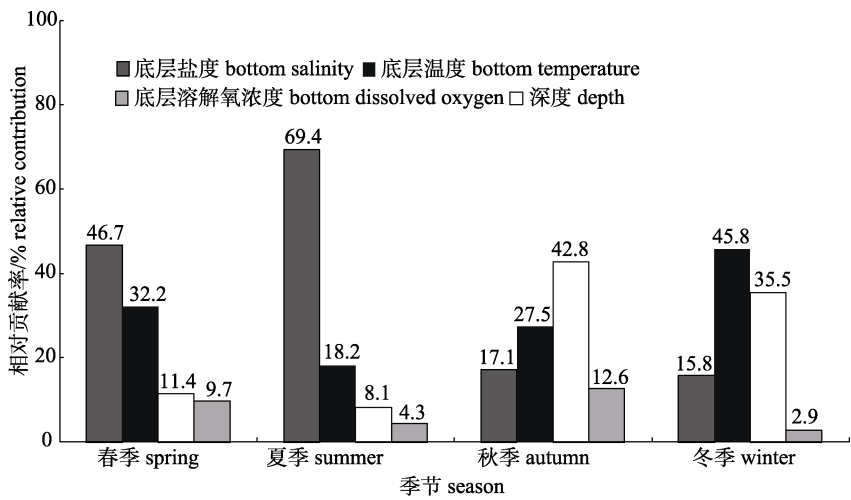


图 3 不同季节环境因子相对贡献率

Fig. 3 Relative contributions of different environment factors by season

表 2 鮠栖息地适宜性指数模型拟合度比较

Tab. 2 Goodness of fit test of HSI models for <i>Miichthys miiuy</i>			
季节 season	模型 model	R^2	AIC
春季 spring	AMM 算法且未加权的 HSI 模型 unweighted HSI _{AMM}	0.545	-87.672
	GMM 算法且未加权的 HSI 模型 unweighted HSI _{GMM}	0.506	-81.269
	AMM 算法且加权的 HSI 模型 weighted HSI _{AMM}	0.674	-89.471
	GMM 算法且加权的 HSI 模型 weighted HSI _{GMM}	0.524	-84.635
夏季 summer	AMM 算法且未加权的 HSI 模型 unweighted HSI _{AMM}	0.641	-94.277
	GMM 算法且未加权的 HSI 模型 unweighted HSI _{GMM}	0.514	-90.461
	AMM 算法且加权的 HSI 模型 weighted HSI _{AMM}	0.697	-96.964
	GMM 算法且加权的 HSI 模型 weighted HSI _{GMM}	0.527	-91.352
秋季 autumn	AMM 算法且未加权的 HSI 模型 unweighted HSI _{AMM}	0.431	-109.213
	GMM 算法且未加权的 HSI 模型 unweighted HSI _{GMM}	0.495	-115.842
	AMM 算法且加权的 HSI 模型 weighted HSI _{AMM}	0.479	-110.527
	GMM 算法且加权的 HSI 模型 weighted HSI _{GMM}	0.557	-118.613
冬季 winter	AMM 算法且未加权的 HSI 模型 unweighted HSI _{AMM}	0.639	-79.247
	GMM 算法且未加权的 HSI 模型 unweighted HSI _{GMM}	0.607	-77.461
	AMM 算法且加权的 HSI 模型 weighted HSI _{AMM}	0.654	-83.269
	GMM 算法且加权的 HSI 模型 weighted HSI _{GMM}	0.611	-78.531

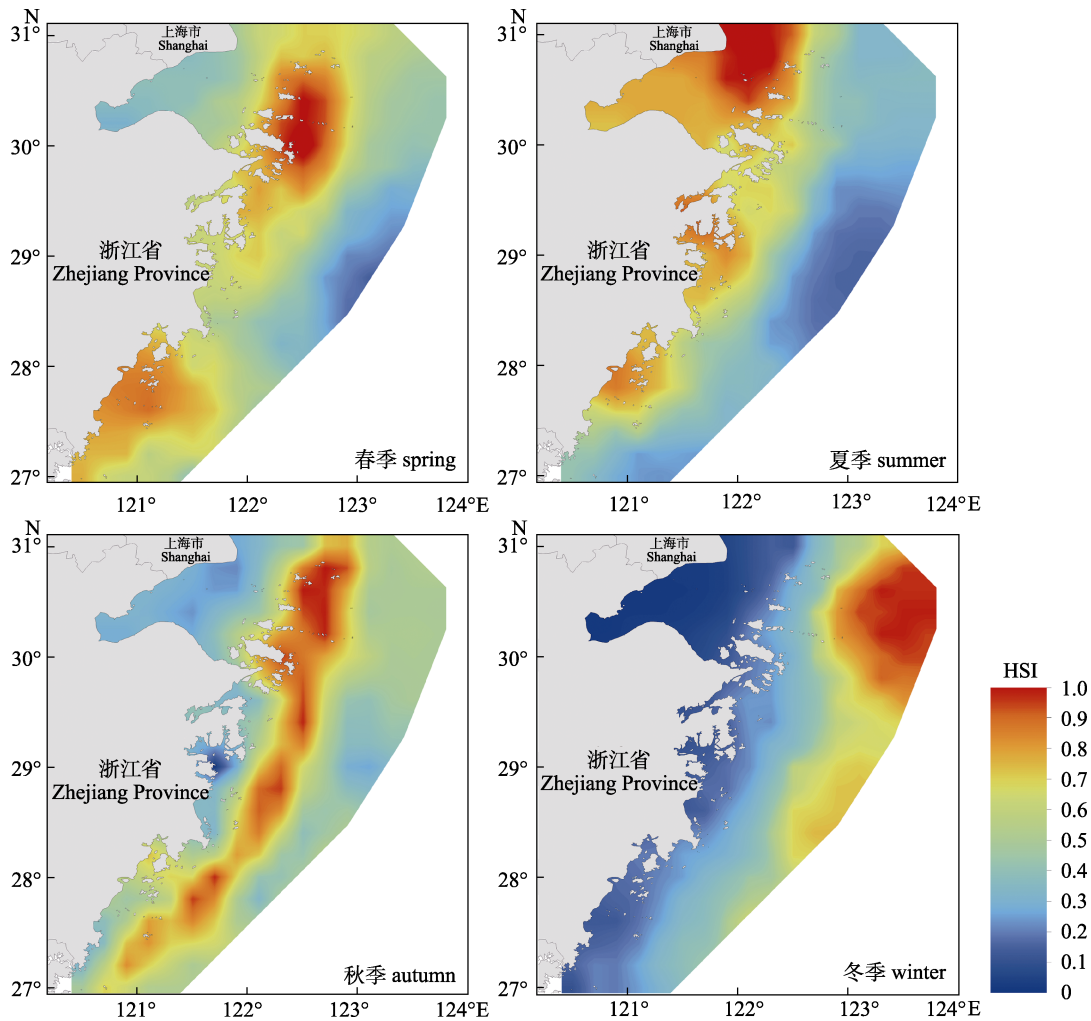


图 4 春、夏、秋和冬季鮠 HSI 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of HSI for *Miichthys miiuy* in spring, summer, autumn and winter

双核分布, 北部核心区位于舟山群岛东侧, 南部核心区位于 28°N~29°N 之间, 其中, 北部核心区分布范围更广, 适宜性指数也更高。此外, 2022—2023 年浙江近岸鲢最适栖息地($HSI \geq 0.7$)在研究水域的占比也存在季节性差异(图 5), 春夏季占比为 30.9%和 34.6%; 秋季占比为四季中最高, 为 41.7%; 冬季占比为四季中最低, 仅

为 26.7%。由图 5 可见, 春、夏和秋季可栖息($HSI \geq 0.3$)水域面积占比较高, 冬季则较低, 不同季节的海洋环境变化是影响其存在季节差异的重要原因。春季, 可栖息水域占比为四季中最高, 但最适栖息地($HSI \geq 0.7$)占比却较低, 这是因为春季海水温度较冬季虽有所回升, 但最适栖息温度的水域面积占比还较小, 平均水温仅为 11.3 ℃。

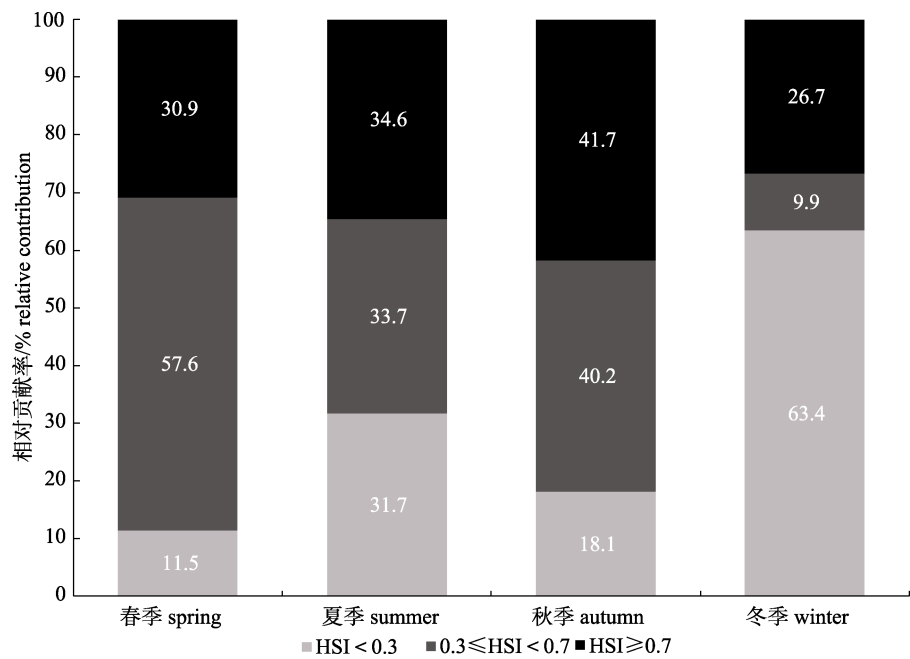


图 5 不同季节鲢不同适宜度栖息地在研究水域中所占比例
Fig. 5 Relative proportions of habitats with different HSI levels for *Miichthys miiuy* in different seasons

3 讨论

3.1 影响浙江近海鲢栖息地适宜性的因素

浙江近海鲢冬季在离岸侧深水海域越冬, 春季洄游至浙江近岸海域摄食和育肥, 夏季进入河口产卵, 秋季大多数鲢回到近岸海域索饵^[3,26]。本文对与浙江近海鲢栖息地分布有关的环境因子和生物因子进行了研究。BRT 结果证明, 春、夏两季中底层盐度对鲢栖息地贡献率较大。已有研究发现, 盐度变化可以通过改变鱼类所处水环境的渗透压来影响仔、稚鱼存活率^[27], 夏季, 鲢主要分布在低盐度的近岸河口水域, 最适盐度范围为 26.4~31.5, 这与鲢人工养殖盐度条件及鲢胚胎高孵化率、低畸形率盐度范围基本吻合^[6-7,28]。秋、冬两季, 深度和底层温度对鲢栖息地贡献率较

大。已有研究表明, 温度是影响鱼类摄食和生长的重要环境因素之一^[29], 人工饲养条件下水温在 14.5 ℃ 以上时, 鲢正常摄食, 生长速率较快, 而水温在 13.2 ℃ 以下时鲢摄食受到抑制, 生长速率下降显著^[30]。秋、冬季受气温降低影响, 浙江近岸河口水域温度明显下降, 此时温度变化可能成为影响鲢栖息地分布的主要环境因素, 深度则通过改变水团和洋流等间接影响海水温度与盐度^[31], 进而对鲢栖息地产生影响。冬季, 近岸侧浅水区水温下降至全年最低水平, 此时近岸栖息地不再适宜鲢生活。研究发现, 124°E 附近海域底层水温为同期最高(16.5 ℃), 适宜的温度使得该海域成为鲢理想的越冬场^[26]。因此, 结合鲢的洄游习性、BRT 模型结果及栖息地适宜性变化规律发现, 浙江近海鲢栖息地分布与其自身生活习性 & 海洋环

境的季节性变化密切相关。

3.2 鲢栖息地的时空分布特征

从时间分布特征来看,浙江近海鲢栖息地分布具有显著季节性变化规律。春季,随着越冬期结束,鲢开始从深海越冬场向浙江近岸海域洄游^[26],该时期研究区域内 HSI 总体偏低,虽然海水温度较冬季有所回升,但最适栖息温度水域的分布范围相对有限。夏季,鲢可栖息水域面积占比较春季有所减少,但最适栖息水域面积占比有较大提升,这一现象与鲢的繁殖生态特征密切相关:夏季鲢集中洄游至河口近岸水域产卵,此时研究区域内的河流径流量达到峰值^[32],导致河口低盐区向外海扩张,低盐海域面积大幅增加^[33],为鲢提供了适宜的产卵生境。秋季,鲢可栖息水域占比较高,最适栖息水域面积占比为全年最高,值得注意的是,该时期鲢幼鱼尾数占比最高,表明浙江近海为鲢幼鱼提供了广泛的栖息空间,并且秋季鲢栖息地的最适盐度和温度范围在四季中最广(表 1),这与鲢早期生长发育研究结果相符^[7]。冬季,受气温大幅度降低的影响,近岸侧海水温度显著下降,促使鲢向水温相对较高的深水区进行越冬洄游,这导致研究区域内鲢的可栖息水域和最适栖息水域面积占比均降至全年最低水平。

从空间分布上看,浙江近海鲢最适栖息地呈现显著的季节性变化规律。春季鲢最适栖息地集中分布于舟山渔场中的 122°E~123°E 海域以及洞头列岛周边海域。受不同水团交汇作用的影响,该海域营养盐含量丰富,生物饵料充沛^[34],为鲢提供了优质的摄食和育肥场所。夏季鲢最适栖息地向近岸侧偏移,主要分布于浙江近岸的河口及其周边海域,这可能与夏季河川径流量增加导致河口水域低盐区向外扩张有关,其中以杭州湾和长江口交汇区最适栖息地分布范围最广,且 HSI 值较其他河口区更高,这是因为长江作为我国径流量最大的河流,其夏季充沛的冲淡水在 31°N、122°E(舟山群岛西侧)海域附近形成一冲淡水舌向东延伸至 123°E 海域^[35],为鲢亲体的繁殖以及鱼卵、仔稚鱼的孵化和早期发育提供了广阔且适宜的生境,这与我国近海经济鱼类产卵场主要分布于盐度较低的近岸或者河口的研究结果一致^[28]。

秋季鲢最适栖息地呈现条带状分布特征,自 31°N、123°E 海域向 27°N、121°E 海域延伸,主要集中于 20 m 至 40 m 等深线之间的水域。该分布特征可能与鲢繁殖后的行为策略有关,亲鱼在产卵后向产卵场外围迁移以避免与幼鱼争夺饵料或者捕食幼鱼。此外,秋季龙头鱼是浙江近海鲢的主要饵料生物^[36],有研究表明此时该区域龙头鱼资源丰度较高^[37]。冬季鲢最适栖息地向东北方向偏移,广泛分布于 123°E 以东海域,其主要原因是受台湾暖流北上的影响,冬季 124°E 以西底层水域形成一个向西北方向延伸的暖水舌^[35],使得该海域底层水温较周围水域更高,为鲢等经济鱼类的越冬提供了相对适宜的环境条件。

4 总结

本研究揭示了浙江近海鲢栖息地分布的季节性差异,这种差异与环境因子的动态变化及鲢在不同生活史阶段对环境因子的响应密切相关。通过增强回归树(BRT)模型对各环境因子进行权重分配,提升了栖息地适宜性指数(HSI)模型的稳定性和预测精度,较好地模拟了浙江近海鲢栖息地的时空分布格局。然而,鱼类时空分布格局的形成机制复杂多样,除海水温度和盐度外,洋流、底质类型等非生物因子以及饵料生物分布、种间竞争等生物因子也可能对其产生重要影响。因此,未来研究应进一步整合多源环境数据,综合考虑生物与非生物因子的交互作用,以提高栖息地模型的预测能力和生态解释力。

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. [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.]
- [2] Wang Y M, Pan X, He Y, et al. Hypolipidemic activities of two pentapeptides (VIAPW and IRWWW) from miiuy croaker (*Miichthys miiuy*) muscle on lipid accumulation in HepG2 cells through regulation of AMPK pathway[J]. Applied Sciences, 2020, 10(3): Article No.817.
- [3] Peng M M, Chen F, Fang Z. Review on fishery biology of *Miichthys miiuy*[J]. Fishery Information & Strategy, 2020, 35(4): 273-278. [彭苗苗, 陈峰, 方舟. 鲢(*Miichthys miiuy*)

- 基础生物学研究进展[J]. 渔业信息与战略, 2020, 35(4): 273-278.]
- [4] Lee S H, Kim Y H, Chung S D, et al. Age and growth of Brown croaker, *Miichthys miiuy*[J]. The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science, 2016: 143-143.
- [5] Zhang X J, Tang J H, Xiong Y, et al. The biological characteristics and spatial distribution of Chinese drum *Miichthys miiuy* along Jiangsu coastal areas in summer[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2008, 23(5): 376-381. [张学江, 汤建华, 熊琰, 等. 江苏近岸夏季鲢的生物学与空间分布特征[J]. 大连水产学院学报, 2008, 23(5): 376-381.]
- [6] Zhong X M, Tang J H, Zhang H, et al. Temporal and spatial distribution of *Miichthys miiuy* in Jiangsu coastal waters[J]. Haiyang Xuebao, 2010, 32(3): 95-106. [仲霞铭, 汤建华, 张虎, 等. 江苏近岸海域鲢时空分布特征研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(3): 95-106.]
- [7] Shan L Z, Xie Q L, Shao X B, et al. Study on embryonic development and morphological characteristic habitual behavior for larvae, juvenile and young of *Miichthys Miiuy*[J]. Marine Sciences, 2010, 34(1): 75-79, 96. [单乐州, 谢起浪, 邵鑫斌, 等. 鲢鱼胚胎发育及其仔、稚、幼鱼形态特征和生活习性的初步研究[J]. 海洋科学, 2010, 34(1): 75-79, 96.]
- [8] Xu Z, Li M Y, Chen H Q. Study on the embryonic development of *Miichthys miiuy*[J]. Marine Sciences, 2007, 31(2): 93-97. [徐镇, 李明云, 陈惠群. 鲢鱼胚胎发育的研究[J]. 海洋科学, 2007, 31(2): 93-97.]
- [9] Liu F, Lou B, Chen R Y, et al. Relationship between morphological traits and body mass of *Miichthys miiuy*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 4059-4066. [刘峰, 楼宝, 陈睿毅, 等. 鲢形态性状与体质量的关系[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 4059-4066.]
- [10] Miao L, Li M Y, Chen Y Y, et al. Development of microsatellite markers for miiuy croaker, *Miichthys miiuy* (sciaenidae), and their application in verifying gynogenesis of large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea*, induced with *M. miiuy* sperm[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2015, 46(1): 83-91.
- [11] Luo Q, Zhou X F, Lv X, et al. Identification and functional regulation of three alternative splicing isoforms of the fthl27 gene in miiuy croaker, *Miichthys miiuy*[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2023, 142: 109147.
- [12] Gwak W S, Roy A. Genetic diversity and population structure of brown croaker (*Miichthys miiuy*) in Korea and China inferred from mtDNA control region[J]. Genes, 2023, 14(9): 1692.
- [13] Peng Z L, Liu M H, Fu R B, et al. Comparative studies on the molecular genetic diversities between the Zhoushan wild *Miichthys miiuy* and their early filial generation by AFLP markers[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 19(2): 172-177. [彭志兰, 柳敏海, 傅荣兵, 等. 舟山鲢鱼群体遗传多样性的 AFLP 研究[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(2): 172-177.]
- [14] Gong C X, Chen X J, Gao F, et al. Review on habitat suitability index in fishery science[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(2): 260-269. [龚彩霞, 陈新军, 高峰, 等. 栖息地适宜性指数在渔业科学中的应用进展[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(2): 260-269.]
- [15] Gong C X, Chen X J, Gao F, et al. Importance of weighting for multi-variable habitat suitability index model: A case study of winter-spring cohort of *Ommastrephes bartramii* in the Northwestern Pacific Ocean[J]. Journal of Ocean University of China, 2012, 11(2): 241-248.
- [16] Xue Y, Guan L S, Tanaka K, et al. Evaluating effects of rescaling and weighting data on habitat suitability modeling [J]. Fisheries Research, 2017, 188: 84-94.
- [17] Yuan X W, Jiang Y Z, Gao X D, et al. Spatiotemporal distribution of *Lophius litulon* in the southern Yellow Sea and East China Sea[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(2): 519-526. [袁兴伟, 姜亚洲, 高小迪, 等. 黄海南部及东海黄鮟鱇时空分布[J]. 应用生态学报, 2023, 34(2): 519-526.]
- [18] Chen X Y, Xu K D, Li P F, et al. Analysis of the status of marine fish proliferation and release in Zhejiang offshore[J]. Ocean Development and Management, 2023, 40(9): 128-135. [陈欣怡, 徐开达, 李鹏飞, 等. 浙江近海海洋鱼类增殖放流现状分析[J]. 海洋开发与管理, 2023, 40(9): 128-135.]
- [19] Hodge V, Austin J. A survey of outlier detection methodologies[J]. Artificial Intelligence Review, 2004, 22(2): 85-126.
- [20] Tanaka K, Chen Y. Spatiotemporal variability of suitable habitat for American lobster (*Homarus americanus*) in Long Island Sound[J]. Journal of Shellfish Research, 2015, 34(2): 531-543.
- [21] Zhang Y L, Xue Y, Yu H M, et al. Study on habitat suitability of *Johnius belangerii* during spring in the Haizhou Bay, China[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(6): 83-91. [张云雷, 薛莹, 于华明, 等. 海州湾春季皮氏叫姑鱼栖息地适宜性研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(6): 83-91.]
- [22] Wakeley J S. A method to create simplified versions of existing habitat suitability index (HSI) models[J]. Environmental Management, 1988, 12(1): 79-83.
- [23] Vincenzi S, Caramori G, Rossi R, et al. A GIS-based habitat suitability model for commercial yield estimation of *Tapes philippinarum* in a Mediterranean coastal lagoon (Sacca di

- Goro, Italy)[J]. Ecological Modelling, 2006, 193(1-2): 90-104.
- [24] Brooks R P. Improving habitat suitability index models[J]. Wildlife Society Bulletin, 1997, 25(1): 163-167.
- [25] Valavanis V D, Georgarakos S, Kapantagakis A, et al. A GIS environmental modelling approach to essential fish habitat designation[J]. Ecological Modelling, 2004, 178(3-4): 417-427.
- [26] Zhou Y D, Li S F, Yu C G, et al. Atlas of three fields, one corridor and protected areas for major economic categories in East China Sea district[M]. Beijing: Ocean Press, 2018. [周永东, 李圣法, 俞存根, 等. 东海区主要经济种类三场一通道及保护区图集[M]. 北京: 海洋出版社, 2018.]
- [27] Wang Y F, Zhu X H. A review on impact of salinity on patterns of fish ecophysiology[J]. Studia Marina Sinica, 2002(1): 151-158. [王云峰, 朱鑫华. 盐度对鱼类生态生理学特征的影响[J]. 海洋科学集刊, 2002(1): 151-158.]
- [28] Luo H Z, Fu R B, Chen B, et al. Embryos and early larvae occurrence of *Miichthys miiuy* off Zhoushan and the relationship to salinity[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2006, 25(1): 15-22. [罗海忠, 傅荣兵, 陈波, 等. 舟山近海鲢鱼胚胎和早期仔鱼的发生及与盐度的关系[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2006, 25(1): 15-22.]
- [29] Li X D. Studies on the correlation between the temperature of sea water and fishing grounds[J]. Haiyang Xuebao, 1982, 4(1): 103-113. [李雪渡. 海水温度与渔场之间的关系[J]. 海洋学报, 1982, 4(1): 103-113.]
- [30] Xie L F. Indoor wintering and growth of *Miichthys miiuy*[J]. Journal of Aquaculture, 2004, 25(2): 8-9. [谢立峰. 鲢鱼室内越冬及生长观察[J]. 水产养殖, 2004, 25(2): 8-9.]
- [31] Chen X J. Fishery resources and fishing science[M]. Beijing: Ocean Press, 2004. [陈新军. 渔业资源与渔场学[M]. 北京: 海洋出版社, 2004.]
- [32] Du Y N, Zhu Q Y, Lu Z G, et al. Analysis of the monthly and annual variation characteristics of the amount of seawater inflow in the Yangtze River Estuary over the years[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2019, 40(10): 8-12, 29. [杜亚南, 朱巧云, 吕志钢, 等. 长江口历年入海水量月年变化特征分析[J]. 水利水电快报, 2019, 40(10): 8-12, 29.]
- [33] Hu J W, Wang Q X, Guo Z Q, et al. Analysing interannual variation of Changjiang diluted water spreading and its influencing factors based on remote sensing observations[J]. Chinese Journal of Space Science, 2023, 43(6): 1069-1080. [胡静雯, 王其翔, 郭志谦, 等. 基于遥感数据的夏季长江冲淡水年际间扩展规律及其影响因素[J]. 空间科学学报, 2023, 43(6): 1069-1080.]
- [34] Yu N J, Yu C G, Xu Y J, et al. Fish community structure and biodiversity in the offshore waters of Zhoushan Islands in spring and autumn[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(8): 1374-1383. [于南京, 俞存根, 许永久, 等. 舟山群岛外海域春秋季节鱼类群落结构及生物多样性[J]. 水产学报, 2021, 45(8): 1374-1383.]
- [35] Yu C G. Zhoushan fishing ground fishery ecology[M]. Beijing: Science Press, 2011. [俞存根. 舟山渔场渔业生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [36] Lan D, Hao H B, Jiang R J, et al. Feeding habits of *Miichthys miiuy* in Zhoushan fishing ground[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(9): 1155-1165. [兰丹, 郝辉攀, 蒋日进, 等. 舟山渔场鲢的摄食习性[J]. 中国水产科学, 2023, 30(9): 1155-1165.]
- [37] Sun H Q. A study on the biological characteristics, temporal and spatial distribution, and the relationship with environmental factors of *Harpadon nehereus* in Zhejiang Province coastal waters[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022. [孙浩奇. 浙江近海龙头鱼生物学特征及其时空分布与环境因子关系[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022.]

Study on the habitat suitability of *Miichthys miiuy* along the coast of Zhejiang Province

SHEN Jiarong^{1,2}, JIANG Rijin^{2*}, CUI Mingyuan², YIN Rui², ZHANG Hongliang², LI Qiqun^{1,2}, ZHANG Yurong³

1. Marine and Fisheries Research Institute, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316021, China;

2. Zhejiang Marine Fisheries Research Institute; Scientific Observing and Experimental Station of Fishery, Resources for Key Fishing Grounds, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Key Laboratory of Sustainable Utilization of Technology Research for Fishery Resources of Zhejiang Province, Zhoushan 316021, China;

3. Zhejiang Wanli University, Ningbo 315300, China

Abstract: *Miichthys miiuy* is one of the main economic fish species in the offshore waters of Zhejiang Province. In order to investigate the spatio-temporal distribution of this local fish stock, this study developed suitability curves of *M. miiuy* to environmental factors, using relative abundance and associated environmental data from the bottom trawl fishery surveys during 2022 to 2023 in the offshore waters of Zhejiang. Subsequently, boosted regression trees (BRT) was applied to estimate the weight of each environmental factor, and two composite habitat suitability index (HSI) models were established using the arithmetic mean method (AMM) and the geometric mean method (GMM), separately. The accuracy of HSI models was evaluated using the Akaike information criterion (AIC). The results revealed distinct seasonal patterns in the optimal habitats of *M. miiuy* in offshore Zhejiang. In spring, optimal habitats were primarily located in the Zhoushan fishing grounds and the waters surrounding the Dongtou Islands, characterized by bottom salinity of 28.0–32.1, temperature of 14.2–16.3 °C, dissolved oxygen of 7.8–9.5 mg/L, and water depth of 16–41 m. During summer, optimal habitats shifted to coastal estuary waters, with optimal ranges of 26.4–31.5 for bottom salinity, 24.8–28.1 °C for temperature, 6.9–8.7 mg/L for dissolved oxygen, and 14–35 m for depth. In autumn, optimal habitats moved further offshore, with preferred conditions of 28.4–33.1 for bottom salinity, 19.2–24.2 °C for temperature, 5.8–8.4 mg/L for dissolved oxygen, and 21–44 m for depth. Winter habitats were concentrated between 123°E and 124°E, with optimal ranges of 30.0–34.1 for bottom salinity, 11.0–14.1 °C for temperature, 8.3–9.6 mg/L for dissolved oxygen, and 43–60 m for depth. The BRT identified bottom salinity as the most influential factor in spring and summer, while depth and bottom temperature dominated in autumn and winter. Based on AIC evaluation, the GMM-weighted HSI model exhibited higher accuracy in autumn, whereas the AMM-weighted HSI model performed better in spring, summer, and winter. These results highlight significant seasonal variations in the spatio-temporal distribution of *M. miiuy* habitat, which might be driven by dynamic environmental factors and the distinguish habits of this species.

Key words: *Miichthys miiuy*; habitat suitability index; environmental factor; boosted regression tree

Corresponding author: JIANG Rijin. E-mail: jiangridge@163.com