

文章编号: 1674-5566(2024)06-1345-12

DOI: 10.12024/jsou.20240404532

基于组合物种分布模型研究江苏南部海域小黄鱼的空间分布特征及其影响因素

张虎¹, 沈独清², 薛莹^{2,3}, 石东雨¹, 祝超文¹, 贲成恺¹, 袁健美¹,
胡海生¹, 肖悦悦¹, 祖凯伟¹

(1. 江苏省海洋水产研究所, 江苏 南通 226007; 2. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003; 3. 海州湾渔业生态系统教育部野外科学观测研究站, 山东 青岛 266003)

摘要: 为了应对近海渔业资源日益衰退的问题, 为实施基于空间的渔业管理提供必要信息, 以江苏南部海域小黄鱼为研究对象, 根据2019—2022年在该海域进行的季节性渔业资源综合调查, 结合5个生物和非生物因子, 采用组合物种分布模型(Ensemble species distribution model, ESDM), 研究了该海域小黄鱼的空间分布特征及其主要影响因素。结果显示, 相较于单一物种分布模型, 组合物种分布模型具有更高的AUC值(春季: 0.995 ± 0.002 ; 秋季: 0.985 ± 0.001)和TSS值(春季: 0.935 ± 0.038 ; 秋季: 0.903 ± 0.029)。在春季, 底层水温和底层盐度的重要性水平最高(0.40和0.38), 而在秋季叶绿素a和饵料生物丰度对小黄鱼空间分布的影响较大, 其重要性分别为0.53和0.46。春季小黄鱼主要分布在近岸浅海区域, 整体呈条带状分布; 秋季小黄鱼则主要分布于水深较深的远岸水域, 且适宜分布的海域范围要大于春季, 整体呈块状分布。此外, 小黄鱼的空间分布特征亦呈现出明显的年际差异, 例如在2021年, 其适宜栖息地面积明显小于其他年份, 分布范围也仅限于局部区域。研究表明, 组合物种分布模型具有更优的预测性能, 能够更好地反映小黄鱼的栖息分布特征及其影响因素; 不同季节小黄鱼的适生区及影响因素各有差异。本研究可为揭示该海域小黄鱼的时空分布特征及其变化规律提供理论依据, 为实施基于空间的渔业管理和保护区选划提供基础资料。

关键词: 小黄鱼; 栖息地适宜性; 影响因素; 组合物种分布模型; 江苏南部海域

中图分类号: S 935.1 **文献标志码:** A

近年来, 受到气候变化、过度捕捞、环境污染等自然和人为因素的共同影响, 全球范围内的海洋生态系统普遍严重退化, 由此出现了渔获量下降, 生物多样性水平降低, 渔获个体普遍低龄化、小型化等现象^[1]。在此背景下, 传统的渔业管理已不能满足海洋渔业可持续发展的要求, 基于生态系统水平的渔业管理逐渐为人们所重视, 实现该管理需要物种栖息地和空间分布的信息作为支撑^[2]。

物种分布模型(Species distribution model, SDM)是预测物种潜在空间分布的有力工具, 近年来已成为评估海洋生物的迁移路径和空间管理的重要手段^[3]。然而, 单一物种分布模型常受到不同算法间的差异、参数设置、输入变量选择

等因素的影响, 难以准确评估物种的适宜生境^[4]。为此, 有学者提出了组合物种分布模型(Ensemble species distribution model, ESDM), 该方法由多个单一物种分布模型集合而成, 通过评估和筛选性能较优的模型, 构建最佳模型组合, 能够有效避免过度拟合, 减小估计偏差, 提高置信区间, 极大提高了物种空间分布的预测精度^[5]。近年来, 该模型已广泛应用于物种空间分布领域的研究, DU等^[6]利用5种单物种分布模型集合而成的组合物种分布模型研究了中国和东盟海域149种鲨鱼分布格局; ZIMMER等^[7]利用组合物种分布模型研究了美国科罗拉多州西南部濒危物种鹳雀花(*Eriogonum pelinophilum*)的潜在栖息

收稿日期: 2024-04-30 修回日期: 2024-06-21

基金项目: 2023江苏省省级农业生态保护与资源利用(渔业生态与资源监测)专项(2023-SJ-136, 2023-SJ-137)

作者简介: 张虎(1980—), 男, 正高级工程师, 研究方向为海洋生态与渔业资源。E-mail: ahu80@163.com

通信作者: 薛莹, E-mail: xueying@ouc.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

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

<http://www.shhydx.com>

地,均取得良好的效果。

小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)隶属于鲈形目(Perciformes)石首鱼科(Sciaenidae)黄鱼属(*Larimichthys*),为暖温性底层鱼类,广泛分布于中国的黄渤海、东海以及朝鲜半岛以西海域,主要生活在 26°N 以北, 126.5°E 以西,水深40~80 m的近岸泥沙质海区,是底拖网等网具常见的专捕和兼捕对象^[8]。小黄鱼作为我国四大海产鱼类之一,具有很高的商业和生态价值,在海洋生态系统中处于重要地位,是我国近海的优势鱼种之一,受到广泛关注^[9]。开展小黄鱼栖息分布特征的相关研究,对今后实施基于空间的渔业资源管理和保护区选划具有重要意义^[10]。

本研究以江苏南部海域小黄鱼为研究对象,根据2019—2022年春季和秋季在该海域进行的渔业资源调查数据,基于组合物种分布模型(ESDM)研究了江苏南部海域小黄鱼的栖息分布特征及主要影响因素,旨在揭示该海域小黄鱼的时空分布特征及其变化规律,为实施基于空间的渔业管理和保护区优化提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 数据来源

样品采自2019—2022年春季(3—4月)和秋季(9—10月)在江苏南部海域($121.0^{\circ}\text{E}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$, $31.5^{\circ}\text{N}\sim 33.6^{\circ}\text{N}$)进行的季节性渔业资源底拖网调查,共8个航次。依据实际海况设置21个调查站位,各站位的分布如图1所示。调查船为功率233 kW的单拖渔船,船长32.6 m,宽6.3 m,调查网具采用网口宽度12 m,全长59 m,网囊网目20 mm的有翼单囊拖网。每站位拖速2~3 kn,拖网时间0.5~1 h。调查数据按照拖网时间(1 h)和拖速(2 kn)进行标准化处理。调查方法遵循海洋监测规范第7部分(GB 17378.7—2007)和海洋调查规范第6部分(GB/T 12763.6—2007)。

1.2 影响因素筛选

由于小黄鱼为底层鱼类,根据这一属性并结合相关历史文献^[10],选择底层水温(Sea bottom temperature, SBT)、底层盐度(Sea bottom salinity, SBS)、水深(Depth)、叶绿素a(Chlorophyll a, *Chl.a*)和饵料生物(Prey)等5个因子作为解释变量用于后续模型构建。所用的非生物环境数据来自哥白尼海洋环境监测服务中心网站(<https://http://www.shhydxxb.com>),

时间分辨率为天,空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。根据本课题组进行的小黄鱼胃含物分析数据以及相关历史文献^[11],在春季选择中国毛虾(*Phycocaris simulans*)和戴氏赤虾(*Metapenaeopsis dalei*),秋季选择中国毛虾作为小黄鱼的饵料生物因子,将这些生物在各年份、各个站位的相对丰度(ind/km²)之和经对数转化为 $\ln(Y+1)$ 。此外,本研究将小黄鱼的出现-不出现数据作为响应变量。

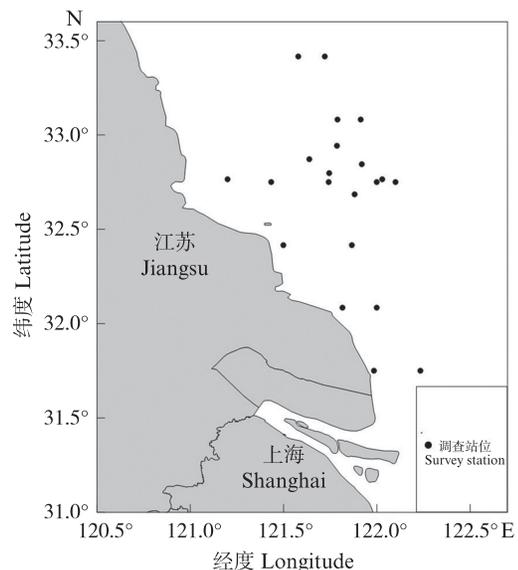


图1 江苏南部海域采样站位分布图

Fig. 1 Distribution of sampling stations in the southern coastal waters of Jiangsu Province

为避免各影响因子之间存在多重共线性,采用方差膨胀因子(Variance inflation factor, VIF)对上述因子进行多重共线性分析,VIF表示变量回归参数的置信区间能膨胀为与模型无关的预测变量的程度。一般认为,若VIF大于10,则表明该因子存在多重共线性,需要剔除^[12]。

1.3 模型构建与评价

本研究构建的组合物种分布模型包含了10种常用的模型,即广义线性模型(Generalized linear model, GLM)、广义加性模型(Generalized additive model, GAM)、随机森林(Random forest, RF)模型、最大熵模型(Maximum entropy model, MaxEnt)、人工神经网络(Artificial neural network, ANN)、广义增强回归模型(Generalized boosted regression model, GBM)、分类树分析(Classification tree analysis, CTA)、表面分布区分室(Surface range

envelope, SRE)模型、多元自适应回归样条(Multivariate adaptive regression spline, MARS)和弹性判别分析(Flexible discriminant analysis, FDA),使用biomod2软件包在R4.3.1环境中对这些模型进行参数拟合^[13]。

通过交叉验证评估各模型的预测性能^[14]。随机选取约80%的测量数据作为建立模型的训练数据集,其余20%作为评估模型性能的测试数据集,迭代运行100次,选择真实技巧统计值(True skill statistics, TSS)和受试者工作特征曲线下面积(Area under the ROC curve, AUC)作为模型预测结果的评价指标^[14]。TSS和AUC值越接近1,代表模型具有较高的准确性,本研究选择AUC>0.8, TSS>0.7的模型作为基础模型^[15],根据各单模型的AUC值,采用模型内置的加权方法对单模型赋予一定权重后集成,构建组合物种分布模型^[16]。权重计算公式如下:

$$W_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^h r_i} \quad (1)$$

式中: W_i 为第*i*个单模型的权重; r_i 为第*i*个单模型的AUC值; h 为AUC>0.8的单模型的个数。

1.4 影响因子对小黄鱼空间分布的影响评价

不同因子对小黄鱼分布的影响各有差异,为反映各因子与响应变量的相关程度,需要对影响因子的重要性进行排序。本研究通过biomod2软件包中的get_variables_importance函数计算各因子置换后均方根误差损失(Root mean square error loss after permutation)的数值来评价因子的

重要性,均方根误差损失越大,表明该因子对小黄鱼空间分布的影响越大^[17]。我们还根据模型的预测结果拟合了各因子对小黄鱼空间分布的响应曲线,得到最适因子范围。

1.5 空间分布图绘制

根据各年份、各季节的影响因子数据,在目标海域以 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 为单位进行网格划分,记录每个网格中心点的经纬度坐标值,使用克里金插值法对各网格中心点的环境和生物因子数据进行填充,将插值获得的数据代入已构建的组合物种分布模型中。模型通过内嵌的栖息地适宜性指数(Habitat suitability index, HSI)计算得到各年份、各季节小黄鱼在各网格点的HSI, HSI>0.7的海域是小黄鱼的适宜栖息地,最后使用surfer软件绘制小黄鱼的HSI分布图。HSI计算公式如下^[18]:

$$I_{\text{HSI}} = \sum_{i=1}^j W_i I_{\text{SL}_i} \quad (2)$$

式中: I_{HSI} 为栖息地适宜性指数HSI; W_i 为第*i*个影响因子的权重; I_{SL_i} 为第*i*个影响因子的适宜性指数; j 为影响因子的数量。

2 结果

2.1 影响因子的共线性检验

通过VIF检验各因子间的多重共线性水平,结果表明,春、秋季各影响因子的VIF值为1.06~5.05(VIF<10,表1),所有因子间均不存在多重共线性,具有统计学意义,可以全部加入到模型中。

表1 生物和非生物因子的多重共线性检验

Tab. 1 Multicollinearity test of biotic and abiotic factors

季节 Season	底层水温 SBT	底层盐度 SBS	水深 Depth	叶绿素 a Chl.a	饵料生物 Prey
春季 Spring	2.46	4.83	1.62	2.25	1.10
秋季 Autumn	1.15	5.05	1.48	4.27	1.06

2.2 模型性能评估

通过100次交叉验证得到biomod2中10个单一物种分布模型在各季节的AUC值和TSS值(图2~3)。通过比较发现,在春季,GAM模型和RF模型具有较好的预测性能,其TSS值分别为 0.786 ± 0.067 和 0.835 ± 0.077 ;AUC值分别为 0.823 ± 0.074 和 0.867 ± 0.082 。秋季各模型的预测性能普遍优于春季,其中GBM、GAM和RF模型性能较

优,其TSS>0.7, AUC>0.8。此外,SRE模型的预测性能较差,其在春、秋季的TSS值和AUC值均为10个模型中最低。综上,春季选择GAM和RF模型进行集成,秋季集成的模型为GBM、GAM和RF。

结果表明(表2),各季节小黄鱼组合物种分布模型的AUC和TSS值均较单一模型更高,这表明组合物种分布模型具有较好的预测效果,其预测性能优于单一物种分布模型。

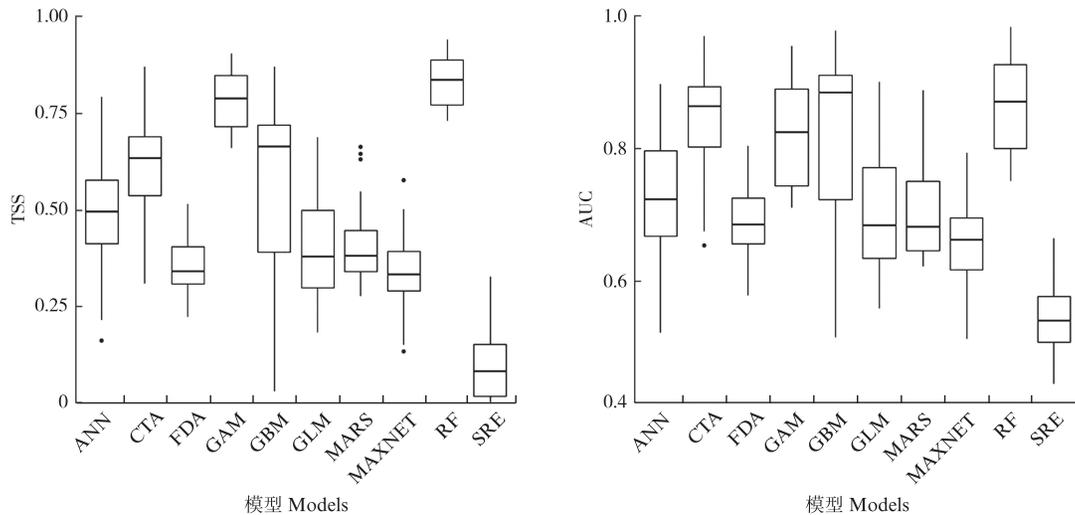


图2 江苏南部海域春季小黄鱼10个单一物种分布模型的AUC值和TSS值
 Fig. 2 Comparison of AUC and TSS of 10 single models for *L. polyactis* in the southern waters of Jiangsu Province in spring

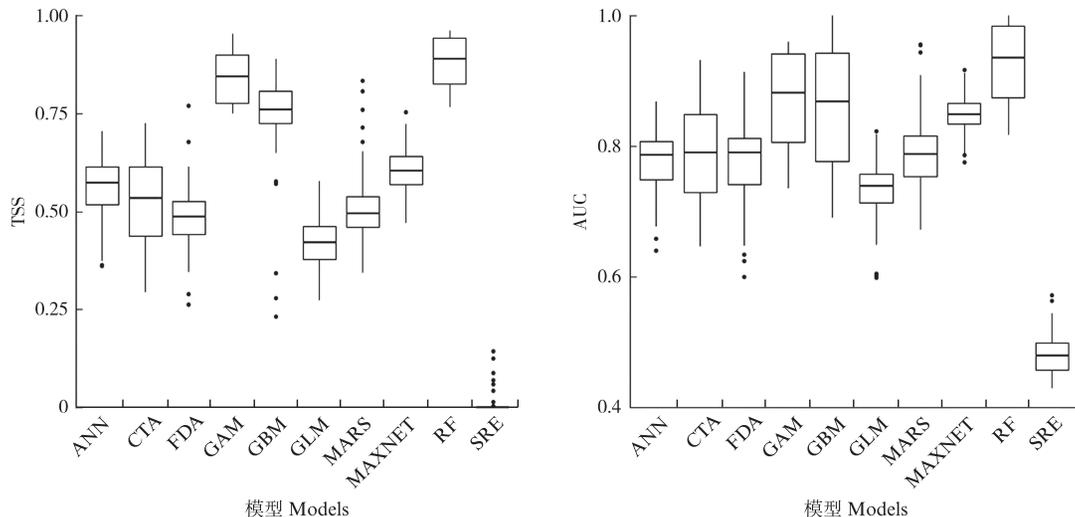


图3 江苏南部海域秋季小黄鱼10个单一物种分布模型的AUC值和TSS值
 Fig. 3 Comparison of AUC and TSS of 10 single models for *L. polyactis* in the southern waters of Jiangsu Province in autumn

表2 江苏南部海域小黄鱼组合物种分布模型的构建
 Tab. 2 Construction of ensemble species distribution model for *L. polyactis* in the southern waters of Jiangsu Province

季节 Season	用于集成的单一模型 Ensembled single models	集成模型的AUC值 Value of AUC for the ensemble model	集成模型的TSS值 Value of TSS for the ensemble model
春季 Spring	GAM、RF	0.995±0.002	0.935±0.038
秋季 Autumn	GBM、GAM、RF	0.985±0.001	0.903±0.029

2.3 小黄鱼空间分布的主要影响因子

通过构建组合物种分布模型分析了5个因子对各季节小黄鱼空间分布的重要性以及响应曲线(图4~6)。研究发现,各因子的重要性因季节而异。在春季,底层水温和底层盐度对小黄鱼空

间分布的影响较大(0.40和0.38),其栖息地适宜性随水温和盐度的升高先增加后降低,当平均水温为17.5℃,平均盐度为23时,小黄鱼的栖息地适宜性达到最大值;饵料生物丰度和叶绿素a浓度对春季小黄鱼分布的影响较小(图5)。在秋

季,饵料生物丰度和叶绿素 a 浓度是最重要的影响因子,其重要性分别为 0.53 和 0.46,其栖息地

适宜性随叶绿素 a 浓度和饵料生物丰度的增加而增加,呈现一致性(图 6)。

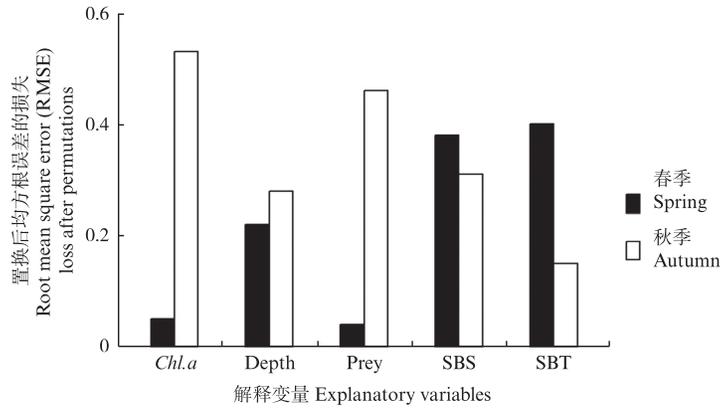
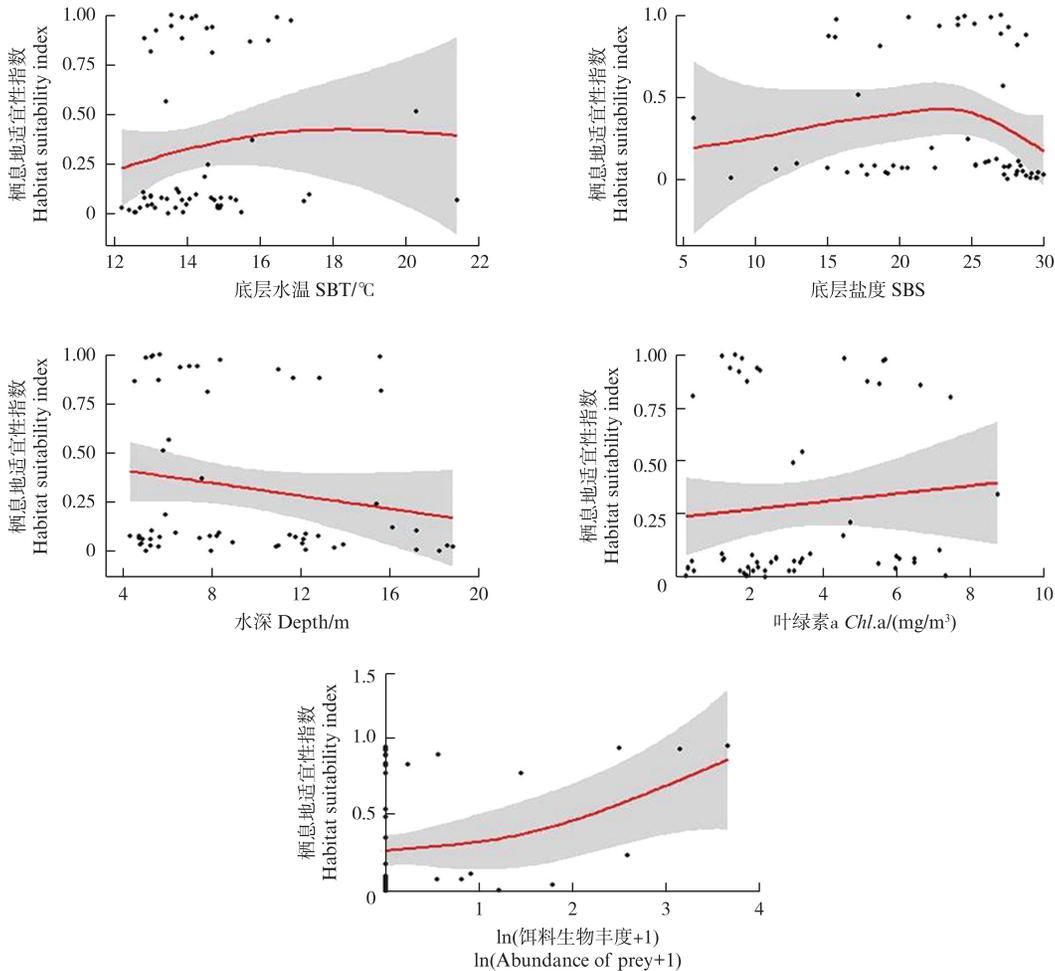


图 4 江苏南部海域小黄鱼空间分布各影响因素的重要性

Fig. 4 Importance of influencing factors in *L. polyactis* distribution in the southern waters of Jiangsu Province

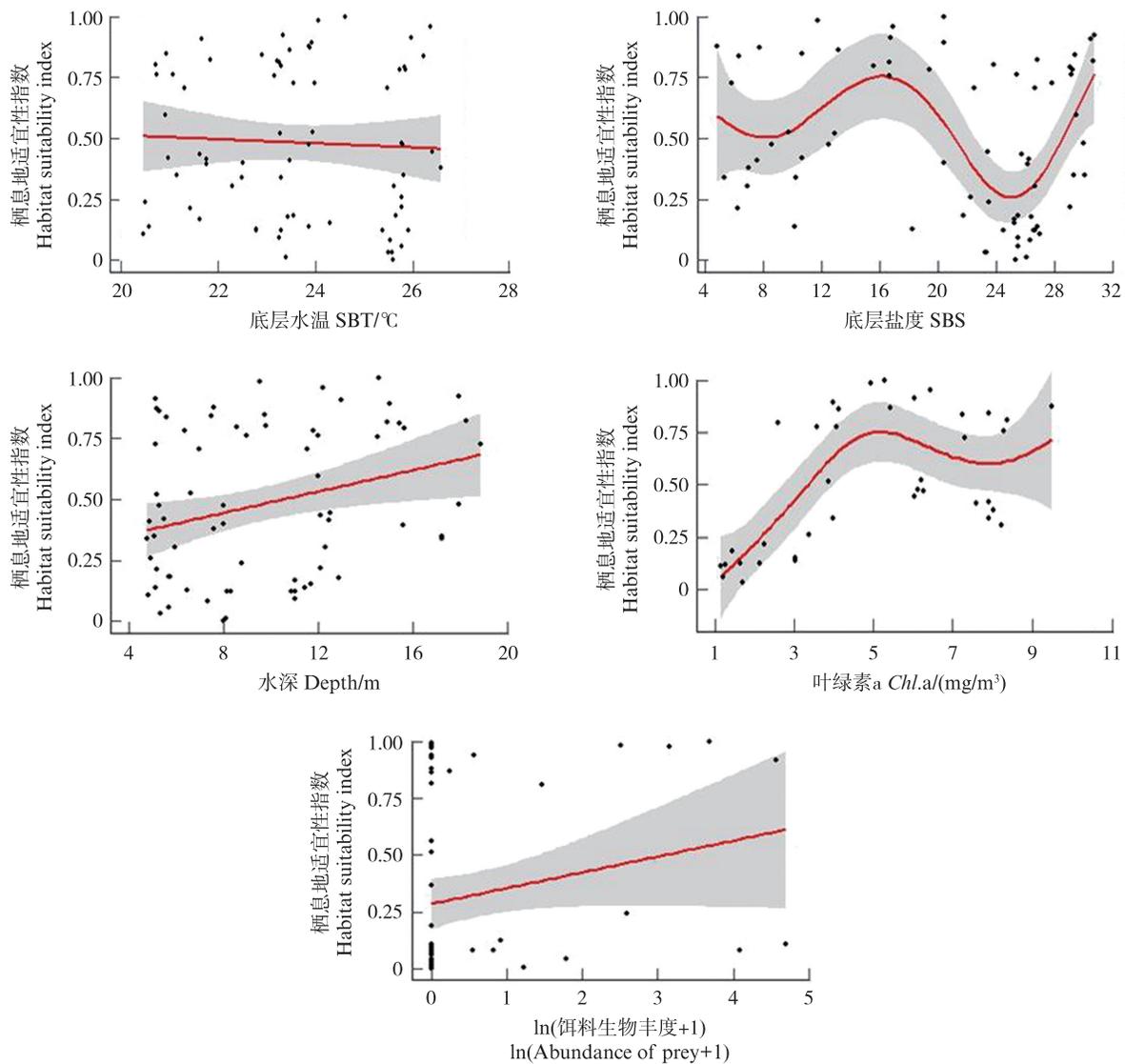


黑色散点表示小黄鱼的栖息地适宜性指数(HSI);灰色阴影部分表示 95% 置信区间;红色曲线表示各因子对小黄鱼栖息地适宜性的响应曲线。

The black scatters represent the habitat suitability index (HSI) of *L. polyactis*; the gray shaded portions represent the 95% confidence interval; the red curves represent the response curve of each factor to the habitat suitability of *L. polyactis*.

图 5 江苏南部海域春季小黄鱼空间分布 5 个影响因子的响应曲线

Fig. 5 Response curves for five influencing factors for the spatial distribution of *L. polyactis* in the southern waters of Jiangsu Province in spring



黑色散点表示小黄鱼的栖息地适宜性指数(HSI);灰色阴影部分表示95%置信区间;红色曲线表示各因子对小黄鱼栖息地适宜性的响应曲线。

The black scatters represent the habitat suitability index (HSI) of *L. polyactis*; the gray shaded portions represent the 95% confidence interval; the red curves represent the response curve of each factor to the habitat suitability of *L. polyactis*.

图6 江苏南部海域秋季小黄鱼空间分布5个影响因子的响应曲线

Fig. 6 Response curves for five influencing factors for the spatial distribution of *L. polyactis* in the southern waters of Jiangsu Province in autumn

2.4 江苏南部海域小黄鱼的栖息地适宜性

基于组合物种分布模型,绘制江苏南部海域小黄鱼在2019—2022年春季和秋季的栖息地适宜性分布图(图7和图8)。研究表明,小黄鱼适宜生境的面积和空间分布特征因季节而异。在春季,小黄鱼主要分布在近岸浅海区域,整体呈条带状分布;秋季小黄鱼逐渐向东北迁移,远离海岸线,适宜生境多分布在 $32.5^{\circ}\text{N} \sim 33.6^{\circ}\text{N}$ 和

$122^{\circ}\text{E} \sim 122.5^{\circ}\text{E}$ 的远岸海域,适宜栖息地的面积相较春季更大,整体呈块状分布。此外,小黄鱼的空间分布特征亦存在明显的年际差异,2019—2021年小黄鱼在春、秋季的分布范围呈现逐年缩小的趋势,特别是2021年,其适宜栖息地的面积为四年中最小,分布范围也仅限于局部区域(图7和图8)。

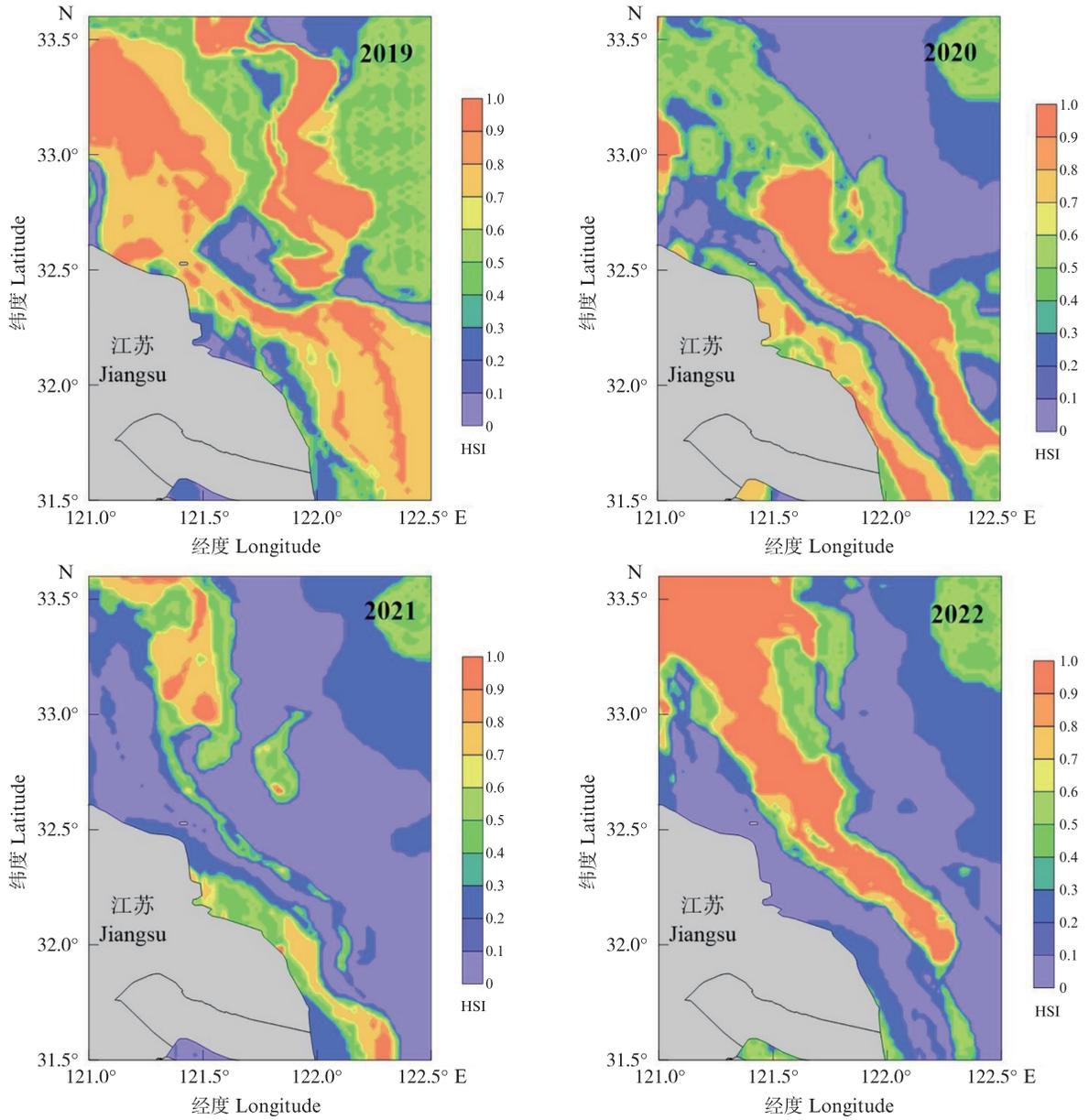


图7 2019—2022年春季江苏南部海域小黄鱼的栖息地适宜性(HSI)分布图

Fig. 7 Distribution of HSI for *L. polyactis* during spring from 2019 to 2022 in the southern waters of Jiangsu Province

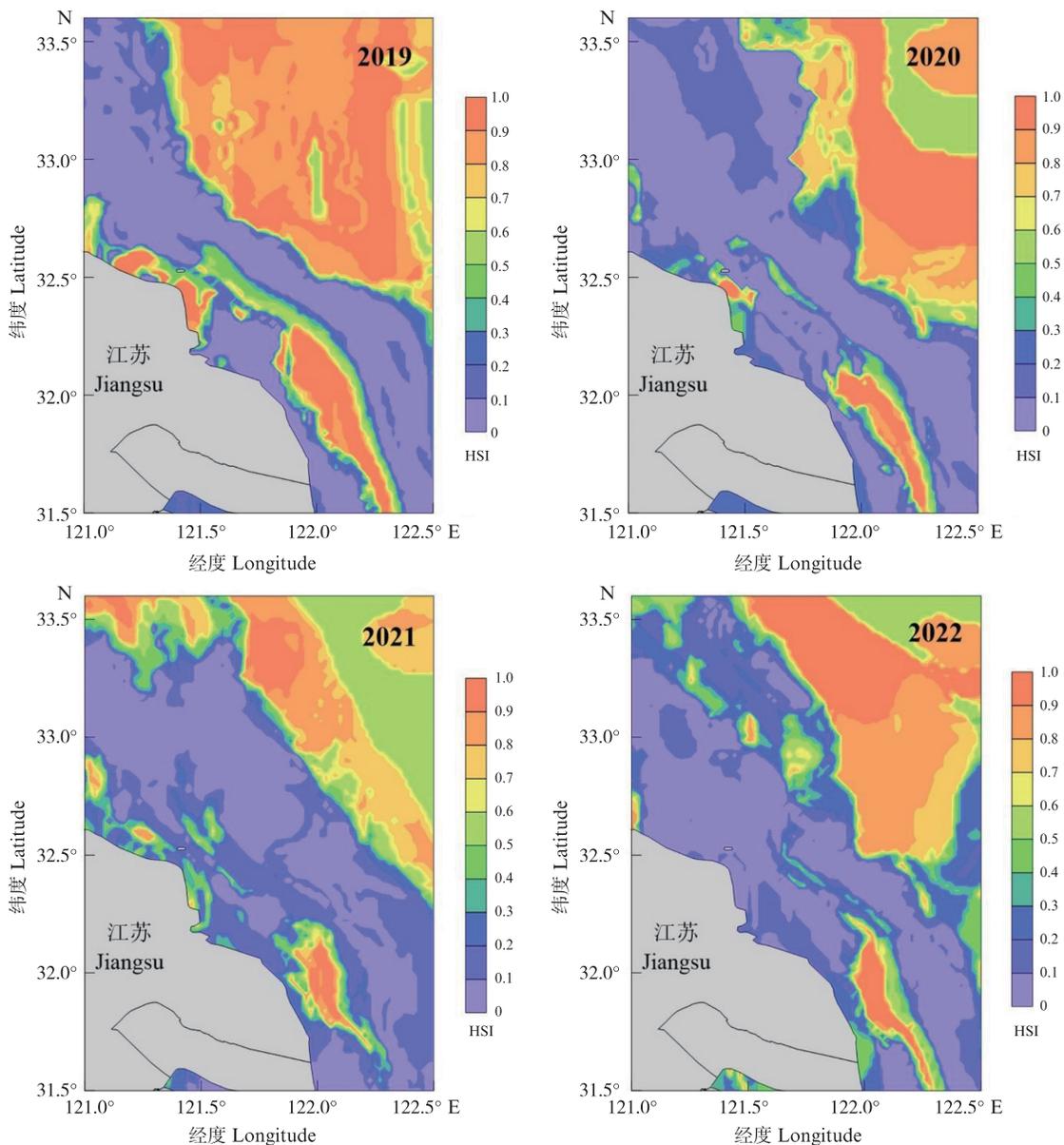


图8 2019—2022年秋季江苏南部海域小黄鱼的栖息地适宜性(HSI)分布图

Fig. 8 Distribution of HSI for *L. polyactis* during autumn from 2019 to 2022 in the southern waters of Jiangsu Province

3 讨论

3.1 模型的预测性能

采用合适的模型是准确预测物种分布的前提,对于渔业资源的养护和管理具有重要意义^[19]。本研究通过AUC值和TSS值比较10种单一模型的预测性能,发现随机森林模型和广义加性模型在春、秋季均表现出极佳的性能,在其他研究中也有类似的结论^[9]。RF模型在构建过程中,遵循随机性原则,可提高抗噪能力,避免陷入过拟合;模型的预测基于众多回归树,通过取平均值的方法确定最终结果,可提高预测结果的精

确度和可信度。此外,RF模型能够识别解释变量间的交互效应,可以处理数据点较少、零值较多的情况,适用于本研究的渔业调查数据^[20-21]。GAM作为一种统计学算法,能够在拟合过程中解释多变量之间的非线性关系,使模型中包含较多的解释变量以提高方差解释率,提高预测结果的准确性^[21]。另外,本研究通过对比发现,SRE模型的预测性能较差,这可能是由于该模型对异常值较为敏感,导致模型预测精度偏低^[22]。

然而尽管如此,经筛选得到的单一物种分布模型仍会因预测结果与真实结果的差异较大、过度拟合等而导致预测的精度较低。此外,单一模

型常常只考虑部分因素对物种分布的影响,难以综合多种因素进行分析,这有可能无法反映物种分布的真实情况^[23]。相比之下,组合物种分布模型能够将各个单模型的优势相结合,将模型输出结果的不确定性、误差相分离,同时将模型的主要趋势与单模型相映射,从而有效避免过拟合,提高模型预测的可信度^[23]。本研究发现,集成多个单一模型的组合物种分布模型(ESDM),其预测性能较好(AUC>0.9、TSS>0.9),优于任何一个单一模型,与ZIMMER等^[7]和陈晓琳等^[18]的结论相一致,由此进一步证明ESDM能够降低模型间的不确定性,提高预测的准确性,更好地反映物种的空间分布特征及动态变化。此外,有研究指出,ESDM尤其适用于濒危物种分布的研究,这对于濒危物种的保护和管理将具有重要意义^[24]。

3.2 江苏南部海域小黄鱼空间分布的主要影响因素

海洋是鱼类赖以生存的空间,通过海洋中水文环境要素信息的提取,可为鱼类空间分布的环境偏好分析提供数据支撑^[25]。小黄鱼为暖温性洄游底层鱼类,因此底层水温等理化环境因素能够对小黄鱼的栖息分布和洄游产生显著影响^[25]。本研究发现,底层水温和底层盐度是影响春季江苏南部海域小黄鱼空间分布的重要因子,与ZHANG等^[9]和YANG等^[10]的研究结果相一致。水温被认为是影响鱼类生理和生态最主要的因子之一,也是控制鱼类个体生理学的关键因素,鱼类会主动选择适宜的水温环境来栖息生存,完成一系列生命活动,因此水温直接影响和控制着鱼类的生存、生长与繁殖^[26]。此外,盐度的变化会影响鱼体内的渗透压平衡调节,进而影响其生长和发育^[27],盐度也会通过水团、海流等海洋水文要素,间接影响鱼类的行为和栖息分布^[27]。春季是小黄鱼繁殖和育幼的季节,此时它们对外界环境条件的波动极为敏感,需要寻找适宜的温度和盐度环境为亲体的产卵,后代的生长、发育和栖息提供保障^[27];此外,春季小黄鱼常栖息于浅湾、河口等沿岸水域,这些水域的水温、盐度等环境因子波动较大,成为影响小黄鱼分布的重要因素^[28]。本研究发现,在春季,当底层水温为17.5℃,底层盐度为23时,江苏南部海域小黄鱼的栖息地适宜性水平最高,结合小黄鱼在春季的分布特征,其底层水温和底层盐度的适宜范围与

适生区的环境条件基本一致,该结果与前人的研究结论也基本相符^[29]。相比之下,秋季底层水温和底层盐度对小黄鱼空间分布的影响较小,这主要是由于秋季为小黄鱼的索饵期,此时水文条件(水温、盐度)等成为次要因子^[27]。除此之外,秋季小黄鱼多分布于远岸海域,其水温、盐度相较于近岸海域变化较小,更稳定,因此水文条件并不是该季节限制小黄鱼分布的主要因子。

饵料生物分布也会影响鱼类对生境的选择,充足的饵料供应亦可以在一定程度上弥补水温、盐度等外界环境条件的波动造成的不利影响^[30]。本研究发现,饵料生物对秋季江苏南部海域小黄鱼空间分布的影响尤为显著。秋季小黄鱼为摄取充足的饵料进行索饵洄游,丰富的饵料生物能够为小黄鱼补充生殖、洄游所消耗的能量,有利于机体的生长发育,为翌年的越冬和繁殖储备能量,因此饵料生物的分布成为影响该季节小黄鱼分布的主要因子。另外,叶绿素a浓度常常是衡量海域初级生产力水平的重要指标^[31]。一般而言,海域的初级生产力水平越高,越能吸引饵料生物集群,生物资源也越丰富,故叶绿素a浓度也是影响秋季小黄鱼空间分布的重要因子。与之相反的是,春季小黄鱼受饵料生物和叶绿素a浓度的影响较小,这主要是由于春季小黄鱼在进行生殖活动时减少或停止摄食,靠索饵期中体内积累的营养为机体供能^[8]。

3.3 江苏南部海域小黄鱼的空间分布特征

研究发现,江苏南部海域小黄鱼的分布特征存在明显的季节差异。在春季,小黄鱼主要分布在底层水温14~16.5℃、盐度5~27、水深3~20m的苏南近岸浅海域;在秋季,则多分布于水深26~50m的海域。这与小黄鱼的生态习性密切相关,春季为小黄鱼的产卵繁殖期,产卵场位于32°00'N~33°15'N和121°30'E~122°15'E之间的长江口以北邻近海域,该海域水深较浅,且受陆地径流影响,盐度偏低,为小黄鱼产卵繁殖提供了理想的环境条件^[27]。秋季是小黄鱼的索饵季节,索饵场大致位于离陆地较远的吕泗渔场东北部海域和连青石渔场东南部海域,这与洋流密切相关^[32]。位于江苏近岸海域存在一支由北向南的沿岸流——黄海沿岸流,该洋流在性质上属于寒流和上升流,当其与附近的黄海暖流交汇,具有不同适温性的物种便会聚集于此,提高

该海域的生物多样性水平;此外上升流会扰动底层的海水向上层补充,把深水区中大量的营养盐带到表层,提高海域内的初级生产力,吸引生物大量聚集,使该海域内的生物资源尤为丰富^[33]。秋季,随着水温逐渐下降,寒流的势力开始增强,由洋流带来的生物资源能够为小黄鱼提供充足的饵料,为越冬洄游做准备。相比于近岸海域,水深较深的偏远海域受人类活动影响较小,洋流的作用更加明显,更容易出现生物集群^[34],因此,小黄鱼在秋季更偏好栖息于远岸水域。研究还发现,与其他年份相比,2021年春、秋季小黄鱼的适宜分布区明显小于其他年份。根据本研究的调查数据显示,2021年江苏南部海域的底层水温明显低于其他年份,这可能是导致小黄鱼最适栖息地面积缩小的主要原因。

目前,“吕泗渔场小黄鱼银鲳国家级水产种质资源保护区”的设立,对于江苏近海小黄鱼资源的保护效果显著,有利于保证小黄鱼生长、发育及繁殖,使其资源在一定程度上得到恢复。本研究通过识别江苏南部近海小黄鱼的适宜栖息地及其年际变化,可为现有保护区的评估提供科学依据。此外,随着全球气候变化日益加剧,极有可能导致受保护物种的栖息地发生变化,进而威胁到受保护的物种^[35]。因此,在未来的研究中,还需考虑长时间尺度下,不同气候变化情景对小黄鱼栖息地的影响及动态变化特征,从而为现有保护区的优化提供理论支撑,以提高渔业资源保护的效果^[36]。

参考文献:

- [1] ZHANG C L, CHEN Y, XU B D, et al. How to predict biodiversity in space? An evaluation of modelling approaches in marine ecosystems [J]. *Diversity and Distributions*, 2019, 25(11): 1697-1708.
- [2] KARNAUSKAS M, WALTER III J F, KELBLE C R, et al. To EBFM or not to EBFM? That is not the question [J]. *Fish and Fisheries*, 2021, 22(3): 646-651.
- [3] DYDERSKI M K, PAŹ S, FRELICH L E, et al. How much does climate change threaten European forest tree species distributions? [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 1150-1163.
- [4] ZHANG Y L, ZHANG C L, XU B D, et al. Impacts of trophic interactions on the prediction of spatio-temporal distribution of mid-trophic level fishes [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108826.
- [5] 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.
- [6] DU J G, DING L K, SU S K, et al. Setting conservation priorities for marine sharks in China and the Association of Southeast Asian Nations (ASEAN) seas: What are the benefits of a 30% conservation target? [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 933291.
- [7] ZIMMER S N, HOLSINGER K W, DAWSON C A. A field-validated ensemble species distribution model of *Eriogonum pelinophilum*, an endangered shrub in Colorado, USA [J]. *Ecology and Evolution*, 2023, 13(12): e10816.
- [8] 刘静, 陈咏霞, 马琳. 黄渤海鱼类图志 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [9] LIU J, CHEN Y X, MA L. Fishes of the Bohai Sea and Yellow Sea [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [10] ZHANG Y L, XU B D, JI Y P, et al. Comparison of habitat models in quantifying the spatio-temporal distribution of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) in Haizhou Bay, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, 261: 107512.
- [11] YANG W, HU W J, CHEN B, et al. Impact of climate change on potential habitat distribution of Sciaenidae in the coastal waters of China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2023, 42(4): 59-71.
- [12] 王凯, 章守宇, 汪振华, 等. 马鞍列岛海域小黄鱼的食性 [J]. *水生生物学报*, 2012, 36(6): 1188-1192.
- [13] WANG K, ZHANG S Y, WANG Z H, et al. Feeding habits of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) off Ma' an archipelago [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, 36(6): 1188-1192.
- [14] RODRIGUES M, DE LA RIVA J, FOTHERINGHAM S. Modeling the spatial variation of the explanatory factors of human-caused wildfires in Spain using geographically weighted logistic regression [J]. *Applied Geography*, 2014, 48: 52-63.
- [15] 张欣雨, 朱泽群, 袁雅欣, 等. 基于组合物种分布模型的小黄鱼栖息地适宜性及其对气候变化的响应 [J]. *草业科学*, 2022, 39(2): 254-267.
- [16] ZHANG X Y, ZHU Z Q, YUAN Y X, et al. Assessment of suitable *Potentilla anserina* habitat and its response to climate change in the source region of the Yellow River based on ensemble species distribution modeling [J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(2): 254-267.
- [17] 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.

- [15] BHAT I A, FAYAZ M, ROOF-UL-QADIR, et al. Predicting potential distribution and range dynamics of *Aquilegia fragrans* under climate change: insights from ensemble species distribution modelling [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(5): 623.
- [16] DREW C A, WIERSMA Y F, HUETTMANN F. Predictive species and habitat modeling in landscape ecology[M]. New York: Springer, 2011: 195-196.
- [17] EKUNDAYO T C, IJABADENIYI O A, IGBINOSA E O, et al. Using machine learning models to predict the effects of seasonal fluxes on *Plesiomonas shigelloides* population density[J]. Environmental Pollution, 2023, 317, 120734.
- [18] 陈晓琳, 纪云龙, 李鹏程, 等. 基于组合物种分布模型的海州湾矛尾虾虎鱼空间分布特征及其影响因素研究[J]. 中国水产科学, 2024, 31(3): 343-355.
- CHEN X L, JI Y L, LI P C, et al. Spatial distribution of *Chaeturichthys stigmatias* and influence factors in Haizhou Bay based on ensemble species distribution model [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2024, 31(3): 343-355.
- [19] GRITTI E S, GAUCHEREL C, CRESPO-PEREZ M V, et al. How can model comparison help improving species distribution models? [J]. PLoS One, 2013, 8(7): e68823.
- [20] QUESADA-RUIZ L C, RODRIGUEZ-GALIANO V F, ZURITA-MILLA R, et al. Area and feature guided Regularised random forest: a novel method for predictive modelling of binary phenomena. The case of illegal landfill in Canary Island[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2022, 36(12): 2473-2495.
- [21] RAJKOVIĆ D, JEROMELA A M, PEZO L, et al. Artificial neural network and random forest regression models for modelling fatty acid and tocopherol content in oil of winter rapeseed [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 115: 105020.
- [22] BUSBY J R. BIOCLIM: a bioclimate analysis and prediction system[J]. Plant Protection Quarterly, 1991, 6(1): 8-9.
- [23] MATHUR M, MATHUR P. Global distribution modelling of *Macrophomina Phaseolina* (tassi) goid: a comparative assessment using ensemble machine learning tools [J]. Australasian Plant Pathology, 2023, 52(4): 353-371.
- [24] RAMIREZ-REYES C, STREET G, VILELLA F J, et al. Ensemble species distribution model identifies survey opportunities for at-risk bearded beaksedge (*Rhynchospora crinipes*) in the southeastern United States [J]. Natural Areas Journal, 2021, 41(1): 55-63.
- [25] 李国东, 李冬佳, 熊瑛, 等. 基于GAM的黄海南部越冬小黄鱼资源丰度与环境因子关系[J]. 海洋渔业, 2023, 45(4): 403-411.
- LI G D, LI D J, XIONG Y, et al. Relationship between environmental factors and abundance of overwintering *Larimichthys polyactis* in the southern Yellow Sea based on GAM[J]. Marine Fisheries, 2023, 45(4): 403-411.
- [26] 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.
- [27] 李子东, 王燕平, 仲霞铭, 等. 江苏海域小黄鱼时空分布及生物学特征研究[J]. 海洋渔业, 2023, 45(1): 73-85.
- LI Z D, WANG Y P, ZHONG X M, et al. Spatio-temporal and spatial distribution and biological characteristics of *Larimichthys polyactis* in Jiangsu sea area [J]. Marine Fisheries, 2023, 45(1): 73-85.
- [28] 邹易阳, 薛莹, 麻秋云, 等. 应用栖息地适宜性指数研究海州湾小黄鱼的空间分布特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(8): 54-63.
- ZOU Y Y, XUE Y, MA Q Y, et al. Spatial Distribution of *Larimichthys polyactis* in Haizhou Bay Based on Habitat Suitability Index [J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(8): 54-63.
- [29] 王雅丽, 王晶, 周永东, 等. 基于two-stage GAM的舟山渔场及邻近海域小黄鱼时空分布特征[J]. 中国水产科学, 2022, 29(4): 633-641.
- WANG Y L, WANG J, ZHOU Y D, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of *Larimichthys polyactis* in Zhoushan fishing ground and the adjacent waters based on two-stage GAM [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(4): 633-641.
- [30] ZERBINI A N, FRIDAY N A, PALACIOS D M, et al. Baleen whale abundance and distribution in relation to environmental variables and prey density in the eastern Bering Sea [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2016, 134: 312-330.
- [31] 宁修仁, 刘子琳, 史君贤. 渤、黄、东海初级生产力和潜在渔业生产量的评估[J]. 海洋学报, 1995, 17(3): 72-84.
- NING X R, LIU Z L, SHI J X. Assessment of primary productivity and potential fishery production in the Bohai, Yellow, and East China Seas [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1995, 17(3): 72-84.
- [32] 李建生, 严利平, 李惠玉, 等. 黄海南部、东海北部夏秋季小黄鱼数量分布及与浮游动物的关系[J]. 海洋渔业, 2007, 29(1): 31-37.
- LI J S, YAN L P, LI H Y, et al. On the relationship between quantity distribution of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis* Bleeker) and zooplankton in southern Yellow Sea and the northern East China Sea in summer and autumn[J]. Marine Fisheries, 2007, 29(1): 31-37.
- [33] YU F, REN Q, DIAO X Y, et al. The sandwich structure

- of the southern yellow sea cold water mass and Yellow Sea warm current [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 8: 767850.
- [34] 傅晓婷. 渤海浮游植物群落结构的季节变化[D]. 天津: 天津科技大学, 2021.
- FU X T. Seasonal variations of phytoplankton community structure in the Bohai Sea and the Yellow Sea [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021.
- [35] GILMOUR M E, ADAMS J, BLOCK B A, et al. Evaluation of MPA designs that protect highly mobile Megafauna now and under climate change scenarios [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 35: e02070.
- [36] CHEUNG W W L, WATSON R, PAULY D. Signature of ocean warming in global fisheries catch [J]. *Nature*, 2013, 497(7449): 365-368.

Spatial distribution and influencing factors of *Larimichthys polyactis* in the southern waters of Jiangsu Province based on ensemble species distribution model (ESDM)

ZHANG Hu¹, SHEN Duqing², XUE Ying^{2,3}, SHI Dongyu¹, ZHU Chaowen¹, BEN Chengkai¹, YUAN Jianmei¹, HU Haisheng¹, XIAO Yueyue¹, ZU Kaiwei¹

(1. *Jiangsu Marine Fisheries Research Institute, Nantong 226007, Jiangsu, China*; 2. *Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong, China*; 3. *Field Observation and Research Station of Haizhou Bay Fishery Ecosystem, Ministry of Education, Qingdao 266003, Shandong, China*)

Abstract: To cope with the increasing decline of offshore fishery resources and to provide essential information for spatial-based fishery management, in this study, the spatial distribution and influencing factors of *Larimichthys polyactis* in the southern waters of Jiangsu Province were examined using an ensemble species distribution model (ESDM) based on the survey conducted during spring and autumn in 2019–2022. Five biotic and abiotic factors were selected to analyze the distribution characteristics of *L. polyactis* and its relationship with influencing factors. Results showed that the ensemble species distribution model had higher AUC (spring: 0.995±0.002; autumn: 0.985±0.001) and TSS (spring: 0.935±0.038; autumn: 0.903±0.029) values than those in single species distribution models. Sea bottom temperature (0.40) and sea bottom salinity (0.38) had the highest importance levels in spring, while chlorophyll a and prey had greater influences on the spatial distribution of *L. polyactis* in autumn with importance levels of 0.53 and 0.46. *L. polyactis* were mainly distributed in coastal areas in spring with a strip-like distribution; while in autumn, *L. polyactis* were mainly distributed in the offshore areas, with suitable habitat mostly distributed in the areas of 32.5°N–33.6°N, 122°E–122.5°E with a block-like distribution, and the area of suitable area is larger than that in spring. Furthermore, the distribution of *L. polyactis* showed obvious interannual differences. For example, the range of suitable habitat for *L. polyactis* in 2021 was prominently smaller than that in other years and the range of distribution was also limited. The study showed that the ESDM had better performance and could better reflect the spatial distribution and influencing factors of *L. polyactis*; the suitable areas and influencing factors for *L. polyactis* varied from season to season. This study can provide a theoretical basis for revealing the spatio-temporal distribution and changing law of *L. polyactis* in this area, and provide basic information for the implementation of space-based fishery management and optimization of marine protected areas (MPAs).

Key words: *Larimichthys polyactis*; habitat suitability; influencing factors; ensemble species distribution model; southern waters of Jiangsu Province