

doi: 10.7541/2024.2023.0271

海州湾及邻近海域金乌贼的空间分布特征及其与环境因子的关系

姜月¹ 张云雷² 逢志伟³ 纪毓鹏^{1,4} 徐宾铎^{1,4} 张崇良^{1,4}
任一平^{1,4} 薛莹^{1,4}

(1. 中国海洋大学水产学院, 青岛 266003; 2. 国家海洋环境监测中心, 大连 116023; 3. 日照市岚山区海洋与渔业监督监察大队, 日照 276800; 4. 海州湾渔业生态系统教育部野外科学观测研究站, 青岛 266003)

摘要: 研究根据2013—2020年在海州湾及其邻近海域进行的渔业资源和栖息环境综合调查数据, 采用支持向量机(Support vector machine, SVM)模型, 通过交叉验证, 结合赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)等评判指标, 构建了金乌贼(*Sepia esculenta*)的空间分布模型, 并分析环境因子对其空间分布的影响, 旨在探究海州湾金乌贼的空间分布特征及其与环境因子的关系。结果表明, 水深对金乌贼空间分布的影响最大, 底层盐度次之, 其次是底层水温和离岸距离。金乌贼的相对资源密度随水深的增大呈现先升高后降低的趋势, 随盐度的升高而增大, 随底层水温和离岸距离的升高而减小。在海州湾水深约27 m, 离岸距离约40 km的海域, 金乌贼的相对资源密度较高, 其分布格局呈现出在东部和中北部海域丰度高, 而西南部近岸海域丰度低的特点。研究将有助于深入了解海州湾金乌贼的空间分布规律, 为其资源的合理利用和科学养护提供参考依据。

关键词: 海州湾; 支持向量机模型; 空间分布; 环境因子; 金乌贼

中图分类号: S932.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2024)04-0617-08



物种的空间分布特征及其与环境因子的关系是渔业生态学研究热点问题之一^[1]。鱼类种群的空间分布受其外部或内部的多种控制因素的影响, 其中外部控制也称为环境控制, 通常被认为是影响鱼类种群空间分布的主要因素, 包括水文条件、底质类型等因素^[2]。因此, 揭示环境因子对鱼类种群空间分布的影响是渔业资源可持续利用的必要条件。物种分布模型(Species distribution model, SDM)是一种利用物种分布区域的环境数据建立的数学模型, 以预测环境条件适合该物种持续存在的空间区域^[3]。根据算法规则的不同, SDMs可分为多种, 其中, 在渔业中最常用的方法是基于统计学算法的模型, 如GAM、GLM、GAMM模型等^[4,5]。

近年来, 随着计算机技术的不断发展, 机器学习算法也逐渐被应用于物种分布的研究和预测。支持向量机(Support vector machine, SVM)是一种具有较强数学理论基础的监督学习算法, 最初只用

于处理分类问题, 但随着理论研究的不断深入, 也可以有效地解决回归问题^[6], 进而成为SDMs中一种常用的机器学习方法。SVM模型在研究物种分布方面具有很多优点, 如适用于小样本多维度数据、易于识别变量间非线性关系等^[6], 在研究和预测物种分布方面有较好表现。例如, Brzozowski等^[7]使用多个物种分布模型来揭示有芒灯枝藻(*Lychnothamnus barbatus*)的潜在分布范围, 结果显示SVM模型的性能优于常用的最大熵模型(MaxEnt)和随机森林模型(Random forest, RF); 李增光等^[8]运用SVM和RF两种方法建立了鱼卵分布和预测模型, 提高了预测精度。

金乌贼(*Sepia esculenta*)隶属于软体动物门(Mollusca)、头足纲(Cephalopoda)、鞘亚纲(Coleoidea)、乌贼目(Sepioidea)、乌贼科(Sepiidae)、乌贼属(*Sepia*)^[9], 系广温性洄游种类, 是我国北部沿海地区一种重要的经济头足类动物^[10,11]。金乌贼具有生命

收稿日期: 2023-08-25; 修订日期: 2023-10-23

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2023MD096); 大连市科技创新基金(2021JJ12SN36)资助 [Supported by Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2023MD096); Dalian Science and Technology Innovation Fund (2021JJ12SN36)]

作者简介: 姜月(2000—), 女, 硕士研究生; 主要从事鱼类空间分布研究。E-mail: jy6000@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 薛莹, 教授; E-mail: xueying@ouc.edu.cn

周期短、繁殖速度快等特点^[12]。李嘉泳等^[13]将金乌贼在黄渤海全年的生活分为4个时期:越冬期(12—次年3月)、洄游期(4—5月)、产卵期(5—7月)和幼体洄游期(8—11月)。金乌贼产卵后其幼体生长较为迅速,活动能力逐渐增强^[13]。

海州湾位于黄海中南部,地处南北气候过渡带,属于开放型海湾,是黄海海域重要的产卵场、育幼场和索饵场,渔业资源丰富^[14]。但近年来,受环境污染、过度捕捞和生境破坏等因素的综合作用,海州湾及附近海域的许多重要经济物种资源都呈现出衰退的趋势^[15]。金乌贼作为海州湾的重要经济种类,具有较高经济价值,是重要的捕捞对象之一。但目前关于金乌贼的研究多集中于20世纪80年代之前,且国内外已有的研究多集中在金乌贼的胚胎发育^[16,17]、内壳生长^[18,19]、生殖和洄游^[13,20]、药理药用^[21,22]、人工繁育^[23]等方面。有关金乌贼空间分布特征的研究较少^[24],亟待开展深入研究。

本研究基于2013—2020年在海州湾及其邻近海域进行的渔业资源和栖息环境综合调查数据,通过构建机器学习算法的SVM模型,分析金乌贼的空间分布特征及其与环境因子的关系,并评估模型的预测性能,旨在深入解析海州湾金乌贼的空间分布规律,为其资源的合理利用和科学养护提供参考,为渔业管理策略的制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

样品采自2013—2020年秋季(9—10月份)在海州湾及其邻近海域进行的渔业资源和栖息环境综合调查,调查海域为34°20'N—35°40'N、119°20'E—121°10'E(图1)。调查方式为分层随机取样,将调查海域划分为76个经度10'×纬度10'的小区,再以水域内底质类型、水深等因素的差异为依据,将76个分区划分为A、B、C、D、E五个区域,各航次在不同区域中随机选取共18个站位进行调查。各航次的调查船相同,均为功率为220 kW、拖速为2—3 kn的单拖渔船,调查网具的网口宽度约25 m,囊网网目大小为17 mm。资源量数据以拖网时间1h和拖速2 kn进行标准化处理,得到金乌贼的相对资源量 $Y(g/h)$ 。环境数据中的水深、底层水温、底层盐度来自CTD同步测定的数据,离岸距离由经纬度信息计算得到。样品的采集、处理、分析过程及环境数据的测定均按照《海洋调查规范(GB/T 12763.6—2007)》^[25]进行。

1.2 支持向量机模型

支持向量机(Support vector machine, SVM)的

主要原理是在一个复杂的非线性模式多维空间中构建一个最优超平面^[26],该超平面将所有样本单元分为两类,使两类中最接近的点以尽可能大的距离分开(即分类),其中分区边界的点称为支持向量,分区中间的平面称为分离超平面^[27];或者以最小的经验风险和建模函数的复杂性拟合数据并预测(即回归)。SVM模型将样本单元投射到多维空间的过程需要一个特殊的核函数来实现^[28]。本研究在建立SVM模型时选择的核函数为径向基核函数,与其他核函数(如多项式核函数或Sigmoid核函数等)相比,该函数具有更少的超参数^[8]。且该核函数属于一种非线性映射,能够灵活地识别并有效处理变量之间的非线性关系。由于环境因子对于物种资源密度的影响往往不是线性的,因此SVM模型的径向基核函数可用于研究金乌贼的空间分布与环境因子之间的关系。

1.3 因子筛选与模型拟合

将金乌贼的相对资源量(Y)转换为 $\ln(Y+1)$ 后作为响应变量,经查阅相关资料,初步选择水深、底层水温、底层盐度以及离岸距离共4种环境因子作为解释变量。采用方差膨胀因子(Variance inflation factor, VIF)^[29]对4个环境因子进行多重共线性检验,将影响模型拟合的因子剔除,以避免因模型中的解释变量之间存在的显著相关性而对研究结果产生负面影响。一般情况下,如 $\sqrt{VIF} > 2$ 则表明变量间存在多重共线性问题。当一个环境因子被剔除后,导致决定系数减少的幅度愈大,说明该环境因子对金乌贼相对资源量的影响程度愈高。

本研究采用逐步回归^[30]的方法构建和拟合模型,首先将进行初步筛选后的环境因子分别代入模型中,根据赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)^[31],在AIC最小的模型中再逐步加入其他

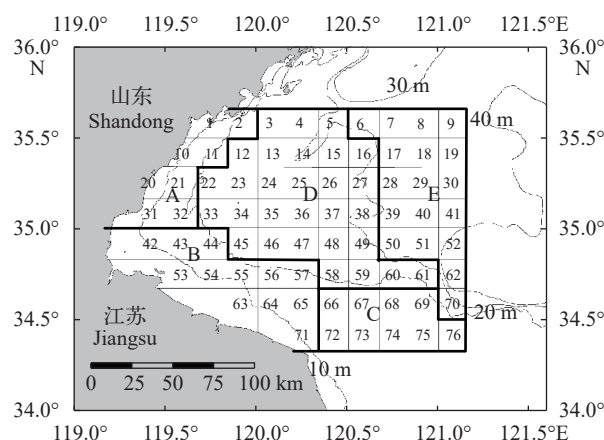


图1 海州湾及其邻近海域调查区域

Fig. 1 Sampling area in Haizhou Bay and adjacent water

因子,直到获得AIC最小的最优模型,此模型则为拟合效果最好的模型。

AIC计算公式如下:

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

式中, k 为参数的数量, L 为似然函数。

1.4 模型效果评估

为了检验SVM模型的预测能力,本研究通过交叉验证的方法对模型性能进行评估。从全部样品中随机选取75%作为训练数据来建立模型,剩余25%作为验证数据,计算预测值与观测值之间的均方根误差RMSE (Root mean squared error), 以及将预测值和观测值进行线性回归得到的决定系数 R^2 (Coefficient of determination), 该过程重复进行100次,根据以上指标对模型性能进行评估。

RMSE是通过反映预测值与观测值之间的偏差来体现数据集的离散程度^[32]。较低的RMSE则代表模型具有较高的预测准确性。计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}$$

式中, n 表示观测次数; O_i 表示观测值; P_i 表示预测值。

决定系数 R^2 表示在因变量的总平方和中由自变量引起的平方和所占的比例^[33], R^2 的大小反映了预测模型的拟合程度,当 R^2 接近于1时,该模型具有更高的参考价值。计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

式中,SSE表示误差平方和,SST表示总离差平方和。

1.5 空间分布预测

FVCOM (Finite Volume Community Ocean Model)是一种先进的沿海海洋环流模型,是非结构化网格、有限体积、自由表面、三维原始模型,因其能够模拟沿海地区复杂的、动态的空间和时间演变的三维地球物理条件而被广泛使用^[34]。本研究将FVCOM模拟的环境数据代入已构建的支持向量机模型中,并利用R软件绘制2013—2020年秋季海州湾金乌贼的空间分布图。

以上构建模型和检验评估模型的过程均通过R-4.2.2软件实现,其中物种分布模型由“caret”包进行构建和拟合。

2 结果

2.1 影响因子筛选

利用方差膨胀因子对4个环境因子(水深、底层温度、底层盐度和离岸距离)进行多重共线性检

验,其 $\sqrt{VIF}$ 分别为1.77、1.16、1.44和1.67。结果表明,各环境因子之间不存在多重共线性,均可加入到模型中。

2.2 模型效果评估

利用均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)两种统计参数进行模型性能评估得到的结果如图2所示。通过进行100次交叉验证得到模型预测值与观测值的均方根误差(RMSE)的平均值为 2.57 ± 0.31 ,决定系数(R^2)的平均值为 0.33 ± 0.13 。金乌贼相对资源量观测值与预测值之间的线性回归分析结果如图3所示,100次交叉验证得到的截距平均值为-0.541,斜率平均值为1.174,模型预测效果较好。

2.3 环境因子对金乌贼空间分布的影响

图4显示了各影响因子的重要性排序。结果显示,在本研究构建的模型中,水深的重要性最高,底层盐度次之,底层水温和离岸距离的重要性程度相差不大(图5)。

海州湾金乌贼相对资源量随水深、底层盐度、底层水温及离岸距离的变化情况如图5所示。

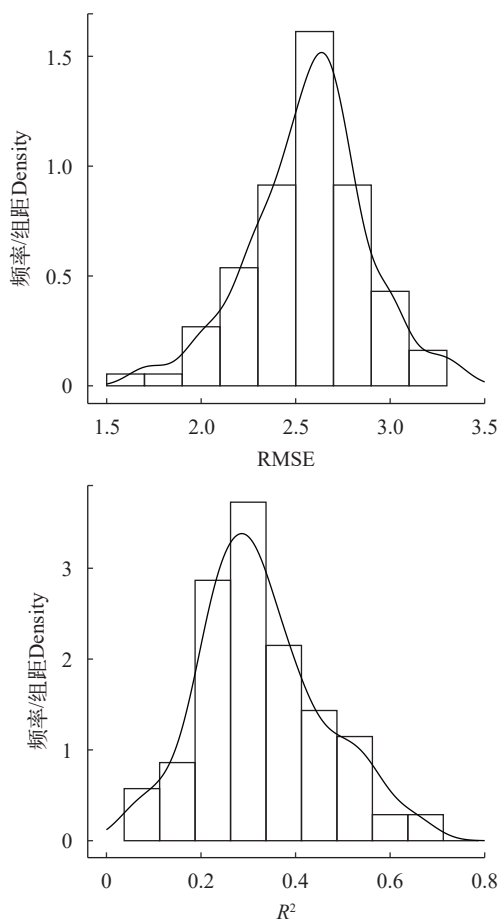


图2 海州湾金乌贼SVM模型的交叉验证结果

Fig. 2 Cross-validation results of the SVM model for *Sepia esculenta* in Haizhou Bay

SVM模型分析结果表明,金乌贼的相对资源量随底层盐度的增大呈明显上升趋势,在26—32的盐度范围内,底层盐度的增大对金乌贼的相对资源量具有正效应。在18—26℃内,金乌贼的相对资源量随底层水温的增大而减小,底层水温对其相对资源量具有明显的负效应。金乌贼的相对资源量随水深和离岸距离的增大呈现先上升后下降的趋势,两响应曲线均存在一个峰值点,所对应的水深在27 m左右,离岸距离在40 km左右(图5)。

2.4 海州湾金乌贼的空间分布特征

2013—2020年秋季海州湾金乌贼的分布规律表现为,中部和北部海域丰度较高,而南部海域丰

度较低(图6)。将FVCOM模拟的环境数据代入已构建的支持向量机模型中,绘制海州湾金乌贼的空间分布图。结果显示,2013—2020年秋季海州湾金乌贼资源的分布规律大体一致,呈现东北部海域高,西南部近岸海域低的特点,在33.9°N—34.3°N、120.2°E—120.8°E的海州湾南部近岸海域内,存在一个明显的低值区(图7)。其中2018和2020年近岸海域低值区向北扩大,延伸到海州湾整个沿岸区域,并呈现离岸距离越大,金乌贼相对资源量越高的趋势。2019年资源量明显增加,中南部海域资源丰度高于其余年份(图7)。

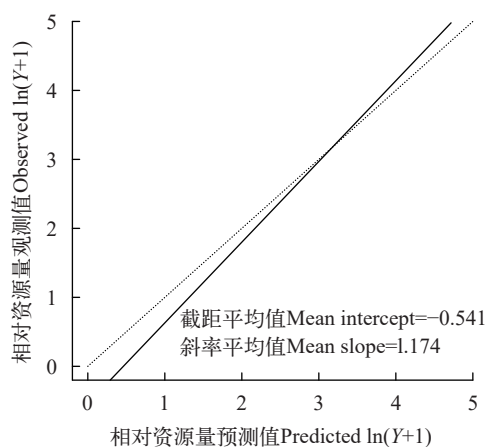


图3 基于SVM模型的海州湾金乌贼的相对资源量观测值与预测值之间的线性回归分析(100次交叉验证)

Fig. 3 Linear regression analysis (100 runs of cross-validation) between observed and predicted relative resource of *Sepia esculenta* in Haizhou Bay based on SVM model

图中黑线表示100次线性回归的平均值;虚线表示观测值与预测值之间的1:1无偏估计

The black line represents the mean of 100 linear regressions. The dashed line represents the 1:1 unbiased relationship between observed and predicted values

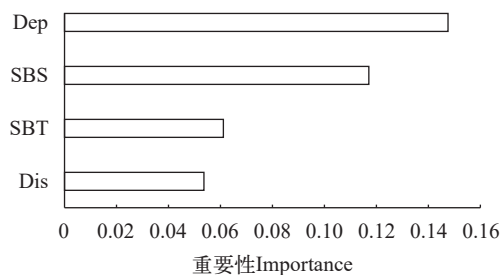


图4 海州湾金乌贼相对资源量影响因子的重要性排序

Fig. 4 Importance ranking of influencing factors on the relative resource of *Sepia esculenta*

SBT. 底层水温 Sea bottom temperature; SBS. 底层盐度 Sea bottom salinity; Dep. 水深 Sea water depth; Dis. 离岸距离 Offshore distance; The same applies below

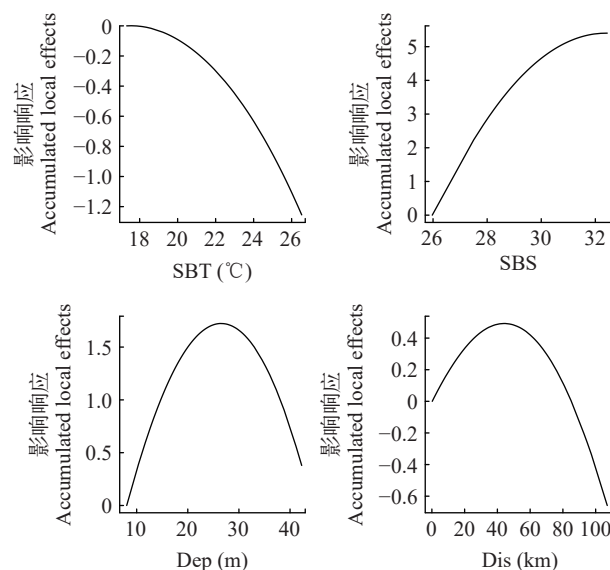


图5 环境因子对海州湾金乌贼相对资源量的影响

Fig. 5 Impact of environmental factor on the relative resource of *Sepia esculenta* in Haizhou Bay

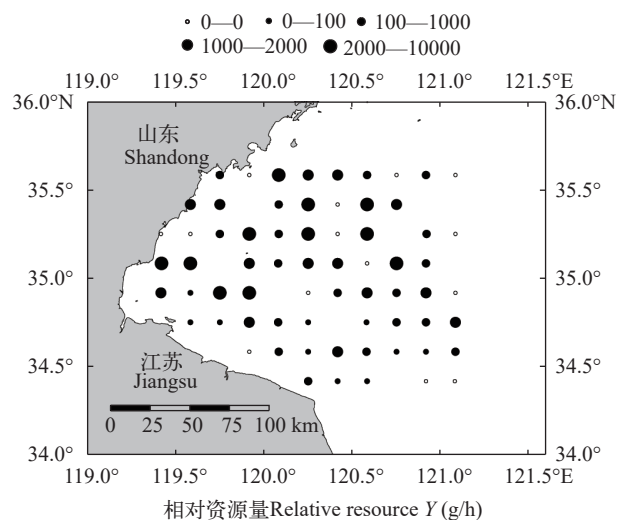


图6 2013—2020年秋季海州湾金乌贼相对资源量的空间分布图

Fig. 6 The spatial distribution of the relative resource of *Sepia esculenta* during autumn from 2013 to 2020 in Haizhou Bay

3 讨论

3.1 模型分析

近年来,支持向量机已经成为许多领域广泛使用的机器学习技术。由于其更大的灵活性和非线性学习能力而取得了较好的预测性能,在回归分类、概率密度估计等领域展现出了广阔的应用前景。随着现代计算机科学的进步,在研究物种分布与环境因子的关系时,可供选择的物种分布模型和统计方法种类众多,如回归树分析(Regression tree analysis)、广义相加模型(Generalized additive model, GAM)和人工神经网络(Artificial neural network, ANN)等,而选择合适的模型将对物种分布的预测效果产生显著影响。尽管上述方法在各个学科中都有比较广泛的应用,但面对多维小样本的预测计

算时,运用一般的建立在大样本前提下的统计方法常常会出现过拟合现象^[35]。而SVM模型有两个显著优势:(1)在结构风险最小化原则的基础上,通过最小化函数的VC维(Vapnik-Cheronenkis Dimension)对学习机器的结构风险进行控制,能够有效抑制模型的过拟合,提高模型的泛化能力。(2)利用泛函数中的Mercer定理,找出一种使样本空间内的内积与特征空间内的内积相对应的核函数,这样就不需要求解非线性映射,只需要求解内积,就可以解决多维样本的非线性分类问题^[36]。

在本研究中,金乌贼空间分布的预测所基于的样本是由渔业资源调查采样获得的,采集的样本数量有限,而且受外界环境或一些其他不可抗力因素的影响,调查中也会存在数据缺失的情况。除此之外,由于各个环境因子对于资源密度的影响往往不是线性的。因此,相较于其他物种分布模型而言,SVM模型更加适合于此类多维小样本生物的模拟预测,它可以在物种适应性和复杂性之间找到最合理的途径,根据有限的样本信息预测物种的空间分布,并获得较好的预测效果。

3.2 金乌贼空间分布与环境因子的关系

金乌贼为一年生动物,生命周期短,生长迅速,产卵群体由补充群体组成,具有较快的资源更新速度,且易受环境因子变化的影响^[37]。有研究显示,作为浅海性底栖种^[38],金乌贼的生长、繁殖过程直接受到水温的影响,同时它是广温性洄游种类,亲体在产卵后会陆续死亡,翌年产卵群体由经越冬洄游和生殖洄游的性成熟个体组成^[39]。其集群、洄游过程也受到水温的影响^[13],进而造成其空间分布和渔获量的变化。SVM模型的拟合结果表明,18℃是秋季适宜金乌贼生活的水温。

金乌贼是狭盐性海洋生物,盐度的变化对其生长发育和空间分布会产生显著影响^[23]。海洋环境中的温、盐等环境因子对鱼类的集群分布具有重要影响^[40]。此外,由于盐度对营养盐的控制,也会影响海洋初级生产力,进而间接导致鱼类种群的数量变动^[41]。陈四清等^[42]研究显示,金乌贼幼体在水体中可正常存活的盐度为24—37,其幼体适宜在较高盐度水体中生存。而本研究中的模型拟合结果显示,在26—32的盐度内,金乌贼的相对资源量会随底层盐度的增加而增大,最适盐度在32左右,与已有结论相吻合。

海洋生物的资源分布受多种因素的综合影响^[43]。水深和离岸距离对于金乌贼栖息分布的影响是间接的,它们是通过影响温度、光照、盐度、溶解氧等其他环境因子来实现的^[44]。由于水深会影响光

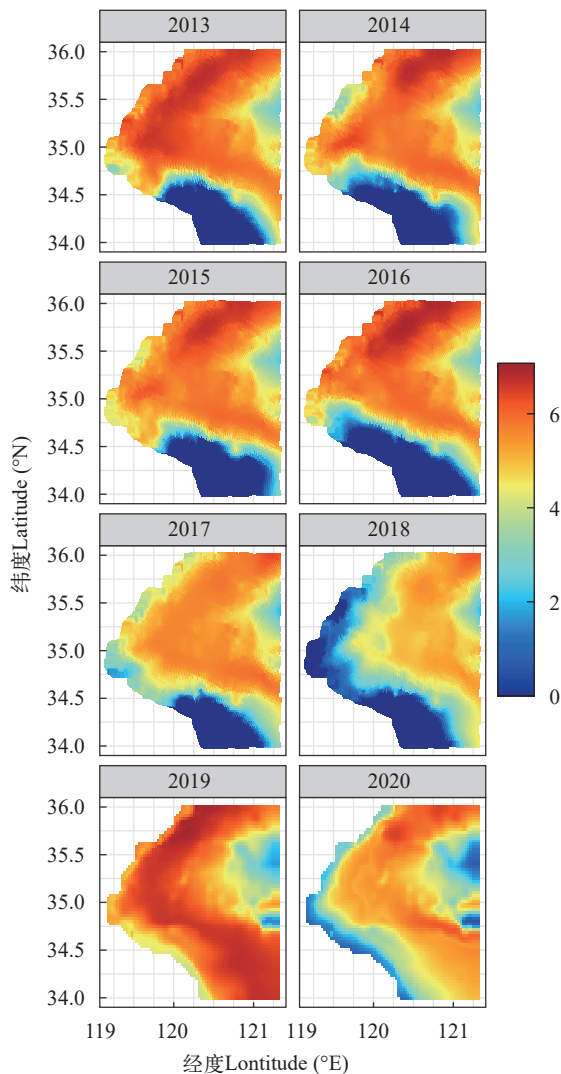


图7 2013—2020年秋季海州湾金乌贼相对资源量 $[\ln(Y+1)]$ 空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution map of relative resource $[\ln(Y+1)]$ of *Sepia esculenta* during autumn from 2013 to 2020 in Haizhou Bay

线的透射度,所以水深影响着各类生物的垂直分布。此外,金乌贼有很强的趋光性,存在明显的昼夜移动现象^[45],因此水深是影响金乌贼空间分布的重要因素。本研究结果表明,在水深约27 m、离岸距离范约40 km处的栖息环境适宜金乌贼的栖息分布,这一结论符合金乌贼在浅海底栖生活的特点^[38]。

3.3 海州湾金乌贼的空间分布特征

本研究发现,海州湾金乌贼空间分布规律呈现东部和中北部海域丰度高,而西南部近岸海域丰度低的特点,这一结论与海州湾的水深分布特征^[15]相一致。海州湾可大致被鲁南深槽分为两个区域,即海州湾西南近岸海域的苏北浅滩(<20 m)和海州湾东北部的深水区。此外,由于海州湾受到黄海冷水团的影响,其东北部深水区域冬季的海水温度高于近海,是短距离洄游生物的良好越冬场所^[15]。结合金乌贼的洄游习性看,李嘉泳等^[13]研究表明,山东沿岸的金乌贼幼体离岸的主要时间在8月份,此时幼体自产卵场开始向越冬场洄游,其越冬场大致位于33°30'N—38°00'N和122°30'E—123°50'E的狭长海区内。因此,金乌贼多分布于海州湾东北部海域,可能是由于在海域各环境因子的综合作用适宜金乌贼栖息生活。此外,海州湾东北部海域是良好的越冬场所,秋季金乌贼自产卵场向东北方向的越冬场洄游,从而在该海域形成聚集区。本研究还显示2019年秋季海州湾金乌贼资源量显著高于其他年份,而2018年及2020年低于其他年份,这可能与该海域的盐度变化有关。从不同年份的环境数据来看,2019年该海域秋季的底层盐度较其他年份偏高,接近金乌贼生存的最适盐度,而2018年和2020年该海域秋季平均底层盐度偏低,导致适宜的栖息地面积减小,因此导致这两个年份海州湾金乌贼在空间分布及资源密度上与其他年份出现了差异。

本研究初步探明海州湾金乌贼的空间分布特征及其对于环境因子的响应关系,对于全球气候变化背景下金乌贼资源的科学养护具有理论指导意义。在后续的研究中将从生态系统的角度开展分析,综合考虑更多因素对金乌贼时空分布的影响,以期进一步提高预测的准确性,为金乌贼资源的科学养护和增殖放流提供理论支撑。

参考文献:

[1] Luan J, Zhang C L, Xu B D, *et al.* Relationship between catch distribution of Portunid crab (*Charybdis bimaculata*) and environmental factors based on three species distribution models in Haizhou Bay [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, **42**(6): 889-901. [栾静, 张崇良, 徐宾铎, 等. 海州湾双斑蟳栖息分布特征与环境因子的关系

[J]. 水产学报, 2018, **42**(6): 889-901.]

[2] Planque, B, Loots C, Petitgas P, *et al.* Understanding what controls the spatial distribution of fish populations using a multi-model approach [J]. *Fisheries Oceanography*, 2011, **20**(1): 1-17.

[3] Duan R Y, Kong X Q, Huang M Y, *et al.* The predictive performance and stability of six species distribution models [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(11): e112764.

[4] 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. [孙浩奇, 蒋日进, 陈峰, 等. 甬江口凤鲚鱼卵、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.]

[5] Despoti S, Stergiou K I, Machias A, *et al.* Assessing the spatial distribution of five non-commercial fish species in the Aegean Sea (Greece, eastern Mediterranean Sea) based on discards data [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2021(44): 101736.

[6] Li X D. Analysis of temporal and spacial distribution of *Portunus trituberculatus* in the northern East China Sea based on multiple models [D]. Zhejiang Ocean University, 2022: 10. [栗小东. 基于多种模型的东海北部海域三疣梭子蟹时空分布特征分析 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022: 10.]

[7] Brzozowski M, Pelechaty M, Bogawski P. A winner or a loser in climate change? Modelling the past, current, and future potential distributions of a rare charophyte species [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2022(34): e02038.

[8] Li Z, Wan R, Ye Z, *et al.* Use of random forests and support vector machines to improve annual egg production estimation [J]. *Fisheries Science*, 2017, **83**(1): 1-11.

[9] Zhang X. Fauna of Economic Animals in China-Marine Molluscs [M]. Beijing: Science Press, 1962: 213-217. [张玺. 中国经济动物志-海产软体动物 [M]. 北京: 科学出版社, 1962: 213-217.]

[10] Dong Z Z. Biology of the Economic Species of Cephalopods in the World Oceans [M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1991: 197-207. [董正之. 世界大洋经济头足类生物学 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1991: 197-207.]

[11] Qi Z Y. Economic Mollusca of China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 293-294. [齐钟彦. 中国经济软体动物 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 293-294.]

[12] Chen X J, Liu B L, Wang Y G. Cephalopods of the World [M]. Beijing: Ocean Press, 2009: 1-699. [陈新军, 刘必林, 王尧耕. 世界头足类 [M]. 北京: 海洋出版社, 2009: 1-699.]

[13] LI J Y. Group reproduction and migratory of *Sepia esculenta* Hoyle in the Yellow Sea and the Bohai Sea [J]. *Journal of Shandong Ocean College*, 1963: 69-108. [李嘉泳. 金乌贼 *Sepia esculenta* Hoyle 在黄渤海的结群生殖和洄游 [J]. 山东海洋学院学报, 1963: 69-108.]

[14] Tang F H, Shen X Q, Wang Y L. Dynamics of fisheries

- resources near Haizhou Bay waters [J]. *Fisheries Science*, 2011, **30**(6): 335-341. [唐峰华, 沈新强, 王云龙. 海州湾附近海域渔业资源的动态分析 [J]. 水产科学, 2011, **30**(6): 335-341.]
- [15] Su W. Diversity of fish community in haizhou Bay and its relationship with environmental factors [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014: 14, 57. [苏巍. 海州湾海域鱼类群落多样性及其与环境因子的关系 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014: 14, 57.]
- [16] Chen S Q, Liu C L, Zhuang Z M, *et al.* Observations on the embryonic development of *Sepia esculenta* Hoyle [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, **31**(5): 1-7. [陈四清, 刘长琳, 庄志猛, 等. 金乌贼胚胎发育的研究 [J]. 渔业科学进展, 2010, **31**(5): 1-7.]
- [17] Lei S H, Wu C W, Gao T X, *et al.* A comparative study of *Sepia esculenta* and *Sepiella maindroni* on embryonic development and ability of salinity tolerance [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, **18**(2): 350-359. [雷舒涵, 吴常文, 高天翔, 等. 金乌贼和曼氏无针乌贼胚胎发育及其盐度耐受能力的比较研究 [J]. 中国水产科学, 2011, **18**(2): 350-359.]
- [18] Fang Z, Yu J, Yang G M M, *et al.* Microstructure of beak and cuttlebone and determination of growth increments for *Sepia esculenta* off coast of East China Sea [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2022, **42**(2): 46-52. [方舟, 俞骏, 杨光明媚, 等. 东海外海金乌贼角质颚与内壳微结构特征及轮纹判读 [J]. 广东海洋大学学报, 2022, **42**(2): 46-52.]
- [19] Lee D G, Park M W, Kim B H, *et al.* Microanatomy and ultrastructure of outer mantle epidermis of the cuttlefish, *Sepia esculenta* (Cephalopoda: Sepiidae) [J]. *Micron*, 2014(58): 38-46.
- [20] Vlasova E V, Sabirov R M, Golikov A V. Reproductive biology of the golden cuttlefish *Sepia esculenta* (Cephalopoda, Sepiida) [J]. *Diversity*, 2023, **15**(3): 455.
- [21] Zheng X D, Yang J M, Wang H Y, *et al.* Analysis and evaluation of the nutritive composition of the ink of the golden cuttlefish *Sepia esculenta* [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2003, **38**(4): 32-35. [郑小东, 杨建敏, 王海艳, 等. 金乌贼墨汁营养成分分析及评价 [J]. 动物学杂志, 2003, **38**(4): 32-35.]
- [22] Liu H Z, Tao Y X, Luo P, *et al.* Preventive effects of a novel polysaccharide from *Sepia esculenta* ink on ovarian failure and its action mechanisms in cyclophosphamide-treated mice [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, **64**(28): 5759-5766.
- [23] Feng A X, Ji B A, Sun C F, *et al.* Artificial breeding and culture technology of cuttlefish [J]. *Scientific Fish Farming*, 2023(1): 66-67. [丰爱秀, 季本安, 孙成峰, 等. 金乌贼人工繁育及养殖技术 [J]. 科学养鱼, 2023(1): 66-67.]
- [24] Niu C, Zhang X M, Ding P W, *et al.* Preliminary assessments on growth characteristics, resource distribution and *Sepia esculenta* releasing effect in Jiaonan coastal water [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, **47**(7): 36-45. [牛超, 张秀梅, 丁鹏伟, 等. 胶南近海金乌贼生长特性、资源分布及增殖放流效果初步评价 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2017, **47**(7): 36-45.]
- [25] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.6-2007, Specifications for Oceanographic Survey-part 6: Marine Biological Survey [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 56-62. [国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6-2007, 海洋调查规范第6部分: 海洋生物调查 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 56-62.]
- [26] Ding S F, Qi B J, Tan H Y. An overview on theory and algorithm of support vector machines [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2011, **40**(1): 2-10. [丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述 [J]. 电子科技大学学报, 2011, **40**(1): 2-10.]
- [27] Robert I K, Wang T. R in Action: Data Analysis and Graphics with R and Tidyverse 3rd ed [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2023: 370-374. [(美)卡巴科弗(Kabacoff, Robert I.), 王韬. R语言实战 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2023: 370-374.]
- [28] Yang Y, Duan Z T. Algorithm and Application of Machine Learning [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020: 53. [杨云, 段宗涛. 机器学习算法与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2020: 53.]
- [29] Liu X, Wang J, Zhang Y, *et al.* Comparison between two GAMs in quantifying the spatial distribution of *Hexagrammos otakii* in Haizhou Bay, China [J]. *Fisheries Research*, 2019, **218**(C): 209-217.
- [30] Wood S N. Stable and efficient multiple smoothing parameter estimation for generalized additive models [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 2004, **99**(467): 673-686.
- [31] Akaike H. A new look at the statistical model identification [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, **19**(6): 716-723.
- [32] Hyndman R J, Koehler A B. Another look at measures of forecast accuracy [J]. *International Journal of Forecasting*, 2006, **22**(4): 679-688.
- [33] Li J W, Chen (C/Z) H, Sun Y, *et al.* Total partial regression square sum method for variable selection in multivariate linear regression model [J]. *Journal of Mathematical Medicine*, 2007, **20**(2): 126-127. [李进文, 陈朝辉, 孙燕, 等. 多元线性回归模型变量选择的总偏回归平方和法 [J]. 数理医药学杂志, 2007, **20**(2): 126-127.]
- [34] Qi J, Chen C, Beardsley R C. FVCOM one-way and two-way nesting using ESMF: development and validation [J]. *Ocean Modelling*, 2018(124): 94-110.
- [35] Zuo W Y, Lao N, Geng Y Y, *et al.* Predicting species' potential distribution-svm compared with garp [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, **31**(4): 711-719. [左闻韵, 劳逆, 耿玉英, 等. 预测物种潜在分布区——比较 SVM 与 GARP [J]. 植物生态学报, 2007, **31**(4): 711-719.]
- [36] Yang Q. SVM prediction and grading of reconstruction

- area of minimal population wild plants in Hainan Island [D]. Haikou: Hainan University, 2014: 7-8. [杨琦. 海南岛极小种群野生植物种群重建区的SVM预测和等级划分 [D]. 海口: 海南大学, 2014: 7-8.]
- [37] Zhang X, Qi Z Y, Li J M. Marine Economic Mollusks from Northern China [M]. Beijing: Science Press, 1955: 91-93. [张玺, 齐钟彦, 李洁民. 中国北部海产经济软体动物 [M]. 北京: 科学出版社, 1955: 91-93.]
- [38] Liu Y X, Liu Y M. Indoor artificial breeding technology of cuttlefish [J]. *Scientific Fish Farming*, 2019(11): 60-62. [刘英霞, 刘英梅. 金乌贼室内人工繁育技术 [J]. 科学养鱼, 2019(11): 60-62.]
- [39] Li Z J, Li W Y, Wang S J, *et al.* The enhancement & releasing status and maintenance countermeasure of golden cuttlefish (*Sepia esculenta*) in coastal Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2019, **32**(6): 64-68. [李战军, 李伟亚, 王四杰, 等. 山东省金乌贼增殖放流现状与资源养护对策 [J]. 水产学杂志, 2019, **32**(6): 64-68.]
- [40] Li X D. Studies on the correlation between the temperature of sea water and fishing grounds [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 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.]
- [41] Wang Y Z, Sun D R, Chen Z Z, *et al.* The influence of climatic environmental factors and fishing pressure on changes of hairtail catches in the northern South China Sea [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(24): 7948-7957. [王跃中, 孙典荣, 陈作志, 等. 气候环境因子和捕捞压力对南海北部带鱼渔获量变动的影响 [J]. 生态学报, 2012, **32**(24): 7948-7957.]
- [42] Chen S Q, Liu C L, Zhuang Z M, *et al.* Effect of feeds and water salinity on growth of golden *Sepia* (*Sepia esculenta*) [J]. *Fishery Modernization*, 2008, **35**(6): 23-25. [陈四清, 刘长琳, 庄志猛, 等. 饵料、盐度对金乌贼幼体生长的影响 [J]. 渔业现代化, 2008, **35**(6): 23-25.]
- [43] Lu Z H, Zhou Y D, Zhu W B, *et al.* Analysis of molluscs community structure in the Zhejiang Coast [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(3): 424-435. [卢占晖, 周永东, 朱文斌, 等. 浙江沿岸水域软体动物群落结构分析 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(3): 424-435.]
- [44] Qiu Y S. The regional changes of fish community on the northern continental shelf of the South China Sea [J]. *Journal of Fisheries of China*, 1988, **12**(4): 303-313. [邱永松. 南海北部大陆架鱼类群落的区域性变化 [J]. 水产学报, 1988, **12**(4): 303-313.]
- [45] Zhang C G, Wang X Q, Cao M, *et al.* Artificial culture technology of cuttlefish [J]. *Hebei Fisheries*, 2016(11): 21-23, 28. [张晨光, 王兴强, 曹梅, 等. 金乌贼人工养殖技术 [J]. 河北渔业, 2016(11): 21-23, 28.]

SPATIAL DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF *SEPIA ESCULENTA* IN HAIZHOU BAY AND ADJACENT WATERS AND THEIR RELATIONSHIP WITH ENVIRONMENTAL FACTORS

JIANG Yue¹, ZHANG Yun-Lei², PANG Zhi-Wei³, JI Yu-Peng^{1,4}, XU Bin-Duo^{1,4},
ZHANG Chong-Liang^{1,4}, REN Yi-Ping^{1,4} and XUE Ying^{1,4}

(1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 3. Marine and Fishery Inspection Brigade of Lanshan District, Rizhao 276800, China; 4. Field Observation and Research Station of Haizhou Bay Fishery Ecosystem, Ministry of Education, Qingdao 266003, China)

Abstract: In this study, we utilized comprehensive survey data of fishery resources and environments in Haizhou Bay from 2013 to 2020. We employed a Support vector machine (SVM) model to analyze the spatial distribution characteristics of *S. esculenta* in Haizhou Bay and assess the impacts of various environmental factors. This analysis involved cross-validation and the use of evaluation indicators, including the Akaike Information Criterion (AIC). Results showed that water depth was the most important factor, followed by bottom salinity, bottom sea temperature and offshore distance. The relative density of *S. esculenta* exhibited a negative correlation with temperature but a positive correlation with salinity. Additionally, the abundance of *S. esculenta* increased firstly with water depth and offshore distance, and then decreased. The relative density of *S. esculenta* was relatively large at water depth of 27 m and offshore distance of about 40 km. The distribution pattern showed a higher abundance in the eastern and north-central areas and a lower abundance in the south western coastal waters. This study contributes to our understanding of the spatial distribution of *S. esculenta* in Haizhou Bay, and provides reference for the rational utilization and scientific conservation of its resources.

Key words: Haizhou Bay; Support vector machine; Spatial distribution; Environmental factor; *Sepia esculenta*