

DOI: 10.12264/JFSC2025-0002

山东近海金乌贼渔场分布及其与捕捞压力和环境因子的关系

姜月¹, 张崇良^{1,2}, 徐宾铎^{1,2}, 纪毓鹏^{1,2}, 任一平^{1,2}, 薛莹^{1,2*}

1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;

2. 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: 金乌贼作为山东近海重要的渔业资源, 其渔场分布及其与影响因子的关系备受关注。本研究根据 2018—2023 年山东近海渔业生产监测数据, 构建基于 Tweedie 分布的广义加性模型(generalized additive model, GAM), 分析了山东近海金乌贼(*Sepia esculenta*)渔场分布特征及其与捕捞压力和环境因子的关系。结果显示, 山东近海金乌贼渔场主要分布在黄海中部的海州湾渔场和青海渔场, 渔场重心年间变化呈现由南向北移动的趋势, 月间变化呈由西北向东南移动的趋势。通过模型比较, 包含捕捞压力、环境因子及时间因子的 Tweedie-GAM 具有最佳拟合效果和预测性能。秋季适宜金乌贼分布的海水底层盐度、底层水温和水深条件分别为 31~34、16~22 °C 和 28 m, 当年的捕捞压力对金乌贼的单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE)具有正效应, 而前一年的捕捞压力则具有负效应。本研究初步揭示了山东近海金乌贼渔场分布特征及其与捕捞压力和环境因子的关系, 可为合理规划商业性捕捞生产、加强金乌贼的科学管理和资源养护等提供参考。

关键词: 金乌贼; 渔场分布; 山东近海; 广义可加模型; Tweedie 类分布

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)07-0970-11

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*), 广泛分布于我国近海、俄罗斯远东海域、朝鲜半岛海域及日本海, 曾是我国北方海域经济价值最大的头足类^[1-3]。金乌贼为一年生动物, 生长迅速, 产卵群体由补充群体组成, 易受环境因子变化的影响^[4]。自 20 世纪 80 年代以来, 我国近海金乌贼资源明显衰退, 产量急剧下降^[5]。自 1991 年起, 山东省针对金乌贼开展规模性的增殖放流, 其资源量在一定程度上得到有效补充, 但仍未完全恢复^[5]。

目前, 渔业生态学家普遍认为, 渔业捕捞等人类活动增加了渔业生物种群对环境变化的敏感性, 进而也加剧了环境变化对渔业生物的影响^[6-8]。

例如, Bartolino 等^[9]发现渔业捕捞改变了大西洋鲱鱼(*Clupea harengus*)的年龄结构, 从而使该种群更加依赖补充量, 导致其对海洋变暖更加敏感。因此, 需要综合考虑捕捞压力和环境因子对渔业种群的影响。

广义可加模型(generalized additive model, GAM)是广义线性模型(generalized linear model, GLM)的非参数拓展, 可采用平滑函数处理响应变量与解释变量之间的非线性关系, 被广泛应用于渔业资源丰度及物种分布与影响因素的关系研究^[10]。渔业生产数据具有获取成本低、时空跨度大等特点, 常被应用于分析渔业资源状况, 然而由于渔具选择性、作业时间及地点等因素, 渔业生产数据中针对单鱼种常会出现大量的资源量为零值的情况, 从而使得单位捕捞努力量渔获量(catch per

收稿日期: 2025-01-08; 修订日期: 2025-03-26.

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2023MD096).

作者简介: 姜月(2000-), 女, 硕士, 研究方向为渔业资源空间分布. E-mail: jy6000@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 薛莹, 教授. 研究方向为渔业资源. E-mail: xueying@ouc.edu.cn

unit effort, CPUE)数据呈现正偏态分布^[11]。GAM 模型通常采用的对数正态分布及伽马分布的概率密度函数,不能较处理好零值数据,因此当样本具有较多零值且呈偏态分布时,采用 Tweedie-GAM 更加适合^[12-14]。

本研究基于 2018—2023 年山东近海的渔业生产监测数据,研究了山东近海金乌贼的渔场分布特征,并构建 Tweedie-GAM 分析了金乌贼 CPUE 与捕捞压力和环境因子的关系,旨在揭示外部驱动因素对金乌贼资源分布的影响,为合理规划金乌贼捕捞生产和开展渔业资源养护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究数据来源于 2018—2023 年采集的渔业捕捞生产监测数据,该数据来自山东 7 个沿海城市的渔业生产监测,包括青岛、日照、潍坊、文登、东营、烟台和滨州。根据金乌贼的渔业生产特点,选择 9—11 月金乌贼拖网的渔业生产监测数据进行分析,包括作业时间、作业渔区、作

业方式、渔船功率和捕捞产量等信息。时间分辨率为日,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (即 1 个渔区)。海洋环境数据来源于哥白尼海洋数据库(<https://data.marine.copernicus.eu/products>)。

1.2 CPUE 计算

本研究将金乌贼渔获量进行标准化处理,利用单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE)表征其渔获量,其计算公式为:

$$CPUE_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} C_{ij}}{\sum_{i=1}^{n_j} p_i * d_{ij}} \quad (1)$$

其中, C_{ij} 表示渔船 i 在渔区 j 的月总渔获量(kg), p_i 表示作业渔船 i 的功率(kW), d_{ij} 表示某月内渔船 i 在渔区 j 的作业天数, n_j 表示某月内在渔区 j 所有作业渔船的数量。

1.3 渔场重心分析

通过 CPUE 的空间分布变化来显示作业渔场的时空分布,以确定渔场重心位置,并绘制渔场重心的变化趋势图,分析金乌贼渔场重心的时空变化情况。渔场重心的计算公式为:

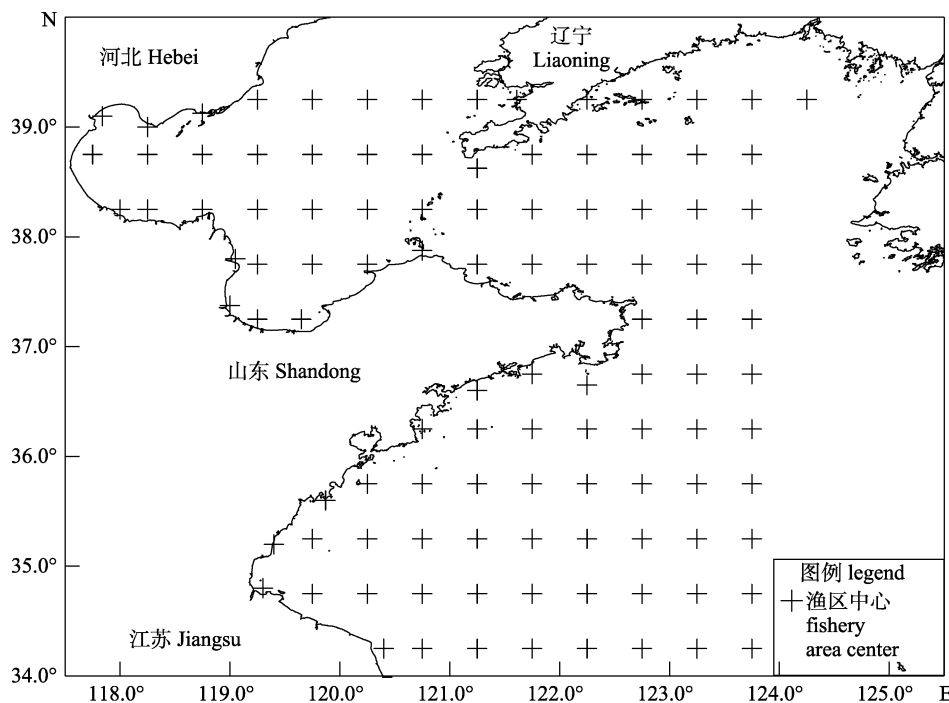


图 1 山东近海渔业生产监测渔区分布

Fig. 1 Fishery areas in the offshore waters of Shandong Province

$$X = \frac{\sum_{j=1}^n \text{CPUE}_j * X_j}{\sum_{j=1}^n \text{CPUE}_j}, Y = \frac{\sum_{j=1}^n \text{CPUE}_j * Y_j}{\sum_{j=1}^n \text{CPUE}_j} \quad (2)$$

其中, X 、 Y 分别代表渔场重心的经度和纬度; X_j 表示渔区 j 中心点的经度, Y_j 表示渔区 j 中心点的纬度; CPUE_j 表示该渔区的 CPUE; n 表示渔区的个数。

1.4 Tweedie-GAM

1.4.1 因子筛选 根据前期相关研究^[15-16], 并结合金乌贼的生态习性^[17], 选取底层水温(sea bottom temperature, SBT)、底层盐度(sea bottom salinity, SBS)、水深(depth)、捕捞努力量[effort($n=t$)]、前

一年份捕捞努力量[effort($n=t-1$)]以及年份(year)共 6 个因子作为解释变量(表 1), 以金乌贼 CPUE 作为响应变量。利用方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)对各因子的多重共线性进行检验, 去除具有较强多重共线性的因子^[18]。

1.4.2 模型构建 GAM 的一般表达式为^[19]:

$$g(Y) = \beta + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \varepsilon \quad (3)$$

其中, g 为连接函数, β 为常数截距项, $f_i(x_i)$ 为用来描述响应变量 $g(Y)$ 与第 i 个解释变量关系的平滑函数, 本研究采用样条平滑法, ε 表示误差项, 假设误差分布符合 Tweedie 分布。

表 1 用于构建 Tweedie-GAM 的解释变量
Tab. 1 Explanatory variables in Tweedie-GAM

变量 variable	缩写 abbreviation	类型 type	描述 description
底层水温/℃ sea bottom temperature	SBT	环境 environment	海底处海水的温度 sea water temperature at sea floor
底层盐度 sea bottom salinity	SBS	环境 environment	海底处海水的盐度 sea water salinity at sea floor
水深/m depth	depth	环境 environment	海面到海底的垂直距离 vertical distance from sea surface to sea floor
捕捞努力量/(kW·d) fishing effort (current year)	effort($n=t$)	捕捞 fishing	所有作业渔船的功率与作业天数乘积的总和 sum of the products of power and operation days of all fishing vessels
前一年份捕捞努力量/(kW·d) fishing effort (previous year)	effort($n=t-1$)	捕捞 fishing	同上(前一年份) same as above (for previous year)
年份 year	year	时间 time	作业年份 operation year

Tweedie 分布是由 Tweedie^[20]引入的一种族群分布, 一般用 $Tw_p(\theta, \varphi)$ 表示, 其密度函数形式由一个参数化的指数族分布确定。Tweedie 分布根据能效参数 p 的不同取值对应不同的分布类型: 例如当 $p=0$ 、1、2、3 时, 分别对应正态分布、泊松分布、伽马分布和逆高斯分布; 当 $1 < p < 2$ 时, 为泊松-伽马混合分布, 适用于处理具有大量零值的非负数据集^[21]。其概率密度方程为:

$$f(y: \theta, \varphi, p) = a(y: \varphi, p) \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} d(y: \theta, p) \right\} \quad (4)$$

其中, θ 为规范参数, φ 为分散参数, p 为能效参数, σ 为标准差, $d(y: \theta, p)$ 为单位偏差。

本研究建立的 Tweedie-GAM 为^[11]:

$$\begin{cases} \text{CPUE} \sim Tw_p(\theta, \varphi) \\ \mu = E(\text{CPUE}) \\ \mu = \beta X + s(\text{factors}) \end{cases} \quad (5)$$

其中, μ 为金乌贼 CPUE 资源丰度的期望值; 解释变量中 X 为线性部分的影响因子的指示变量, β 为模型截距项和各变量的系数等待估参数; s 为自然样条平滑; factors 代表因子型变量。Tweedie 分布的能效参数 p 由 R 4.3.3 统计软件中的 mgcv 程序包确定。

1.4.3 解释变量设置 本研究构建并比较了 3 种模型, 其中模型 1 的解释变量包含环境因子和时间因子, 模型 2 的解释变量包含捕捞压力和时间因子, 模型 3 的解释变量包含环境因子、捕捞压力和时间因子。由于捕捞生产数据中作业渔船较多, 捕捞努力量的数量级较大, 在将其加入模型前进行自然对数转换, 从而减小其异方差性以便进行数据分析。

根据赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)^[22], 首先将进行初步筛选后的因子分别代入

模型中, 在 AIC 最小的模型中再逐步加入其他因子, 直到获得 AIC 最小的模型, 结合方差解释率分别确定 3 种场景下拟合效果最好的模型。

1.4.4 模型效果评估 通过交叉验证的方法对三种模型的性能进行评估和比较。从全部样本中随机选取 70% 作为训练集, 剩余 30% 作为验证集, 分别计算重复 100 次该过程时预测值与观测值之间的均方根误差 RMSE (root mean square error), 以及进行线性回归得到的决定系数 R^2 (coefficient of determination)。

较低的 RMSE 以及较高的 R^2 代表模型具有较好的预测性能。RMSE 计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (6)$$

式中, n 表示观测次数; O_i 表示观测值; P_i 表示预测值。

R^2 计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (7)$$

式中, SSE 表示误差平方和, SST 表示总离差平方和。

2 结果与分析

2.1 金乌贼 CPUE 的时空分布特征

根据 2018—2023 年山东近海金乌贼 CPUE 的年均分布图(图 2)及月均分布图(图 3)所示, 2018 和 2020 年山东近海金乌贼的平均 CPUE 较高, 分别为 0.22 kg/(kW·d) 和 0.36 kg/(kW·d), 作业海域主要集中在黄海中部的大海州湾渔场以及青海渔场, 坐标区域为 119.5°E—122.0°E、34.5°N—37.0°N (图 2)。从月份来看, 9—11 月的平均 CPUE 分别为 0.15 kg/(kW·d)、0.08 kg/(kW·d) 和 0.23 kg/(kW·d), 11 月份高 CPUE 渔区数量较多(图 3)。

2.2 金乌贼渔场重心的时空变动

基于各渔区平均 CPUE 计算的渔场重心结果表明, 2018—2023 年山东近海金乌贼渔场重心主要分布在海州湾渔场的北部以及青海渔场的南部 (120.0°E—121.5°E、35.0°N—36.0°N), 且渔场重心变动的整体趋势是由南向北移动, 其中 2018—2020 年渔场重心的纬度变化不大, 位于海州湾渔场, 2021—2023 年渔场重心的纬度相较前三年显著升高, 移动到青海渔场(图 4)。从月份来

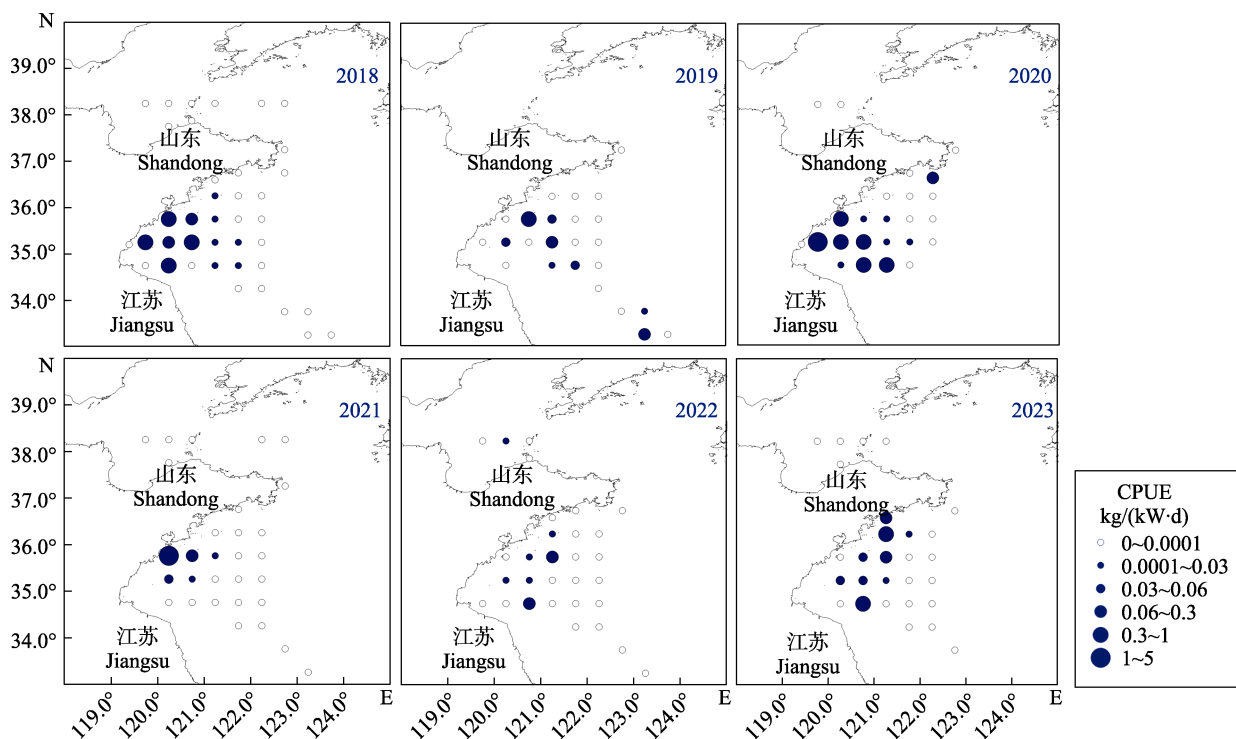


图 2 2018—2023 年山东近海金乌贼年平均 CPUE 的空间分布

Fig. 2 The annual mean CPUE of *Sepia esculenta* in the offshore waters of Shandong Province from 2018 to 2023

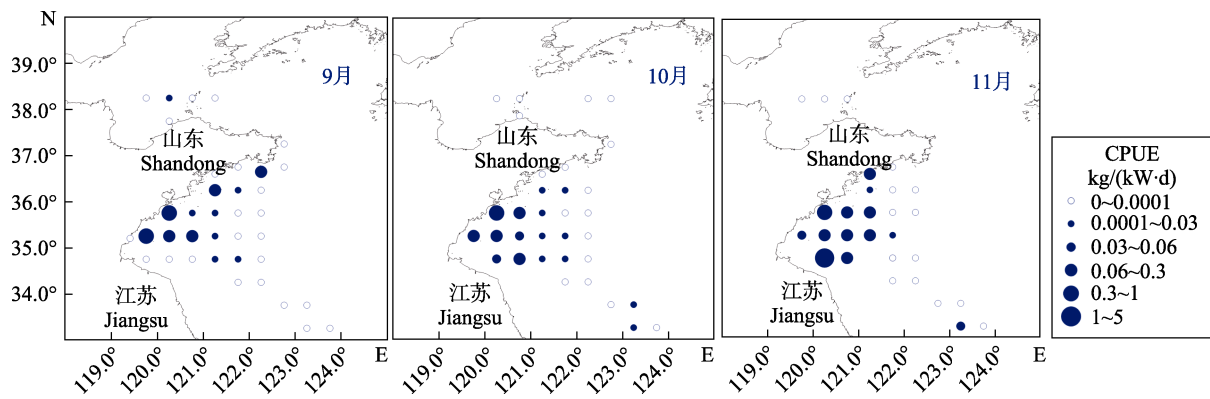


图 3 2018—2023 年 9—11 月山东近海金乌贼月平均 CPUE 的空间分布图

Fig. 3 The monthly trend of CPUE of *Sepia esculenta* in the offshore waters of Shandong Province from September to November, 2018–2023

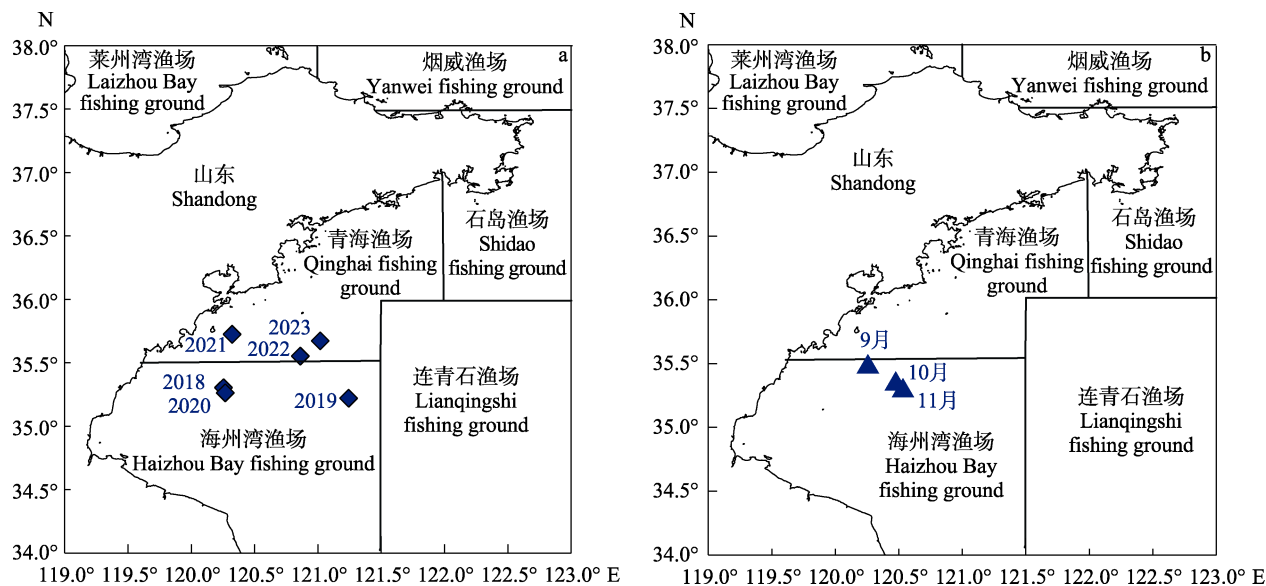


图 4 山东近海金乌贼渔场分布重心的年间变化(a)和月间变化(b)

Fig. 4 Annual (a) and monthly (b) changes in the distribution of fishing ground for *Sepia esculenta* in the offshore waters of Shandong Province

看, 9—11 月渔场重心逐渐由西北方向向东南方向移动(图 4)。

2.3 金乌贼渔场分布的影响因子

利用方差膨胀因子(VIF)对 3 个环境因子(底层盐度、底层温度和水深)以及 2 个捕捞压力(当年捕捞努力量和前一年捕捞努力量)进行多重共线性检验, 结果如表 2 所示, VIF 值均小于 10, 表明各因子之间不存在多重共线性, 均可作为模型的初始变量。

2.4 Tweedie-GAM 效果评估

本研究构建的 3 个 Tweedie-GAM 及各影响因子的相关参数如表 2 所示。在模型 1 中, 当解释

表 2 山东近海金乌贼渔场分布影响因子的多重共线性检验

Tab. 2 Test and degree of multicollinearity of factors influencing the fishing ground distribution of <i>Sepia esculenta</i> in the offshore waters of Shandong Province		影响因子 factors	Tw-GAM1	Tw-GAM2	Tw-GAM3
环境因子 environment factors	SBS	4.590			4.604
	SBT	1.749			1.792
	depth	4.970			4.978
捕捞压力 fishing factors	effort($n=t$)			1.114	1.121
	effort($n=t-1$)			1.114	1.134

注: 表中影响因子对应的数字代表 VIF 值。
Note: The numbers corresponding to the factors in the table represent the VIF values.

变量为环境及时间因子时, 影响金乌贼 CPUE 分布的变量为底层水温、底层盐度、水深和年份, 累积偏差解释率为 43.5%, 其中偏差解释率最大的因子为底层水温(22.6%); 在模型 2 中, 当解释变量为捕捞及时间因子时, 影响金乌贼 CPUE 分布的变量为年份、当年该渔区的捕捞努力量和上一年该渔区的捕捞努力量, 累积偏差解释率为 16.4%, 其中偏差解释率最大的因子为年份(11.3%); 在模型 3 中, 当解释变量为捕捞、环境及时间因

子时, 影响金乌贼 CPUE 分布的变量为底层水温、底层盐度、年份、当年捕捞努力量、水深和前一年的捕捞努力量, 累积偏差解释率为 45.6%, 其中偏差解释率最大的因子为底层水温(22.6%)(表 3)。

交叉验证结果表明, 这 3 个 Tweedie-GAM 的预测性能存在一定差异。根据评价指标 R^2 和 RMSE, Tw-GAM3 (捕捞因子+环境因子+时间因子) 具有较好的预测性能, 其 R^2 较高, 且 RMSE 较低 (图 5)。因此, 本研究选择该模型进行后续的分析。

表 3 山东近海金乌贼最优 Tweedie-GAM 中各因子的相关参数
Tab. 3 Parameters of each factors in the optimal Tweedie-GAMs

模型 model	AIC	Δ AIC	累积偏差解释率/% cumulative deviance explained	偏差解释率/% deviance explained
Tw-GAM1 ($p=1.583$)				
SBT	239.17		22.6	22.6
+SBS	226.23	-12.94	29.6	7.0
+year	210.86	-15.37	39.3	9.7
+depth	207.74	-3.12	43.5	3.8
Tw-GAM2 ($p=1.624$)				
year	258.09		11.3	11.3
+effort($n=t$)	255.68	-5.53	15.0	3.7
+effort($n=t-1$)	252.38	-3.30	16.4	1.4
Tw-GAM3 ($p=1.579$)				
SBT	239.17		22.6	22.6
+SBS	226.23	-12.94	29.6	7.0
+year	210.86	-15.37	39.3	9.7
+effort($n=t$)	207.28	-3.58	41.2	1.9
+depth	205.72	-1.56	44.0	2.8
+effort($n=t-1$)	204.34	-1.38	45.6	1.6

注: 表中 p 值代表 Tweedie 分布的能效参数。
Note: The p value in the table represents the energy efficiency parameter of the Tweedie distribution.

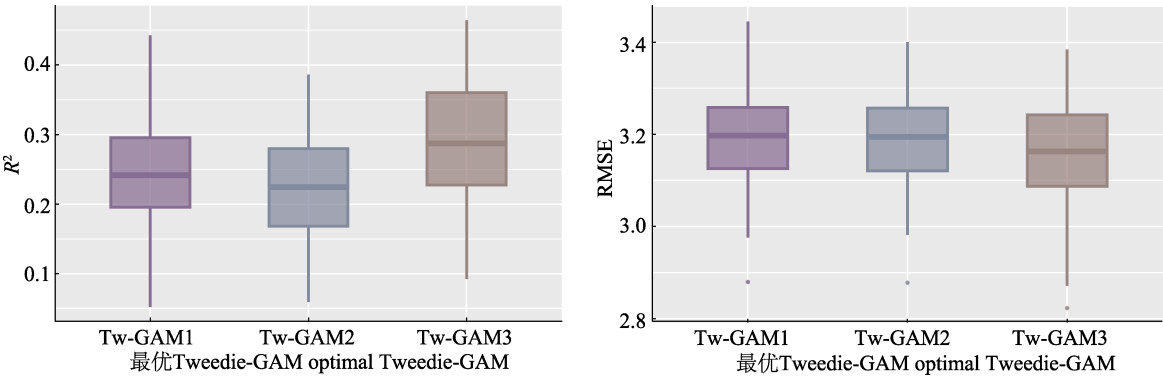


图 5 山东近海金乌贼三种 Tweedie-GAM100 次交叉验证中的 R^2 和 RMSE 值
Fig. 5 Estimates of R^2 and RMSE resulted from 100 times cross-validations of three Tweedie-GAMs

2.5 各因子对金乌贼 CPUE 的影响

研究发现, 山东近海金乌贼的 CPUE 随底层盐度的增大呈现波动上升的趋势, 其中在 28~30 范围内差别不大, 在 31~34 范围内 CPUE 较高。CPUE 随底层水温和水深的增加, 大致呈先上升后下降的趋势, 当底层水温在 16~22 °C

范围内时, 金乌贼 CPUE 较高; 深度响应曲线的峰值点为 28 m 左右, 并在水深小于 28 m 时, CPUE 呈现平缓上升趋势, 水深大于 28 m 时, CPUE 明显下降。当年捕捞努力量对金乌贼的 CPUE 具有正效应, 而前一年的捕捞努力量则具有负效应(图 6)。

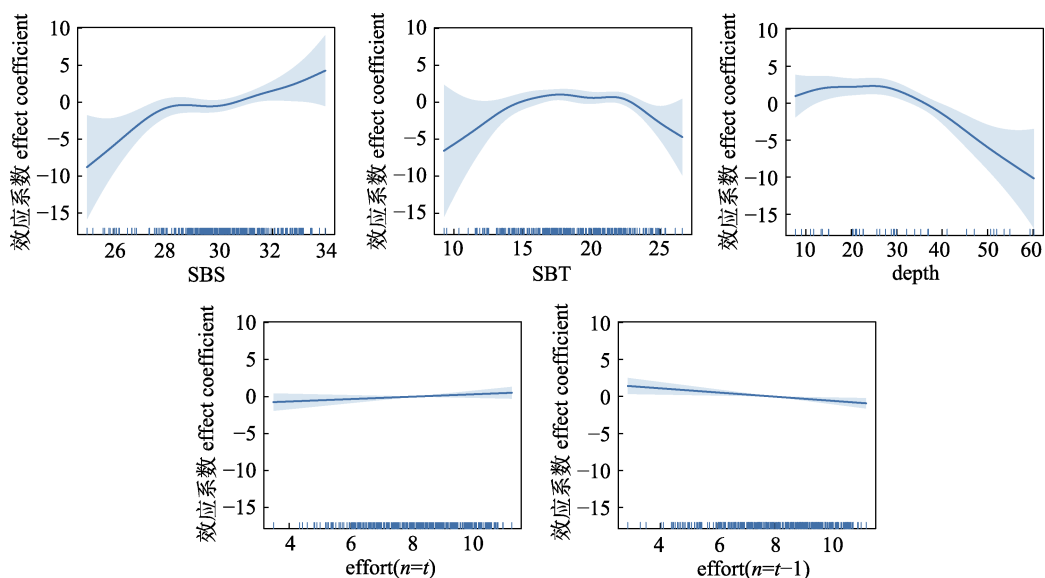


图 6 环境因子和捕捞压力对山东近海金乌贼 CPUE 的影响

图中阴影区域代表 95% 置信区间; 当年捕捞努力量及前一年的捕捞努力量为自然对数化后数值。

Fig. 6 Effects of environment and fishing factors on CPUE of *Sepia esculenta* in the offshore waters of Shandong Province
Shaded regions represent 95% confidence intervals. The fishing effort in the current year and that in the previous year are converted to natural logarithm values.

3 讨论

3.1 Tweedie-GAM 分析

GAM 模型在渔业资源分布及丰度与影响因子间关系的研究中应用广泛。但渔业生产数据以作业范围广、数据量大为特点, 而且针对单物种的渔获量数据常出现大量零值, 传统 GAM 模型的概率密度函数在处理此类零膨胀数据时较易产生偏差^[12]。基于适合处理零膨胀数据的 Tweedie 分布的 GAM 模型对变量的分析则更加灵活、准确^[23]。此外, 本研究中 Tweedie 分布的 3 个能效参数 p 均位于 1~2 范围内, 研究所使用的数据符合泊松-伽马混合分布, 说明该模型能够较好地拟合山东近海金乌贼 CPUE 的时空分布及其与影响因子的关系。

此前关于金乌贼丰度的年际变异性及空间分布研究大多集中在环境因素方面^[15-16], 本研究利用 3 种 Tweedie-GAM 研究了综合考虑捕捞压力和环境因素时模型的拟合效果。结果表明, 相较于单独考虑捕捞压力及环境因素对金乌贼丰度的影响, 同时考虑上述因素的 Tweedie-GAM 显示出更好的拟合效果和预测性能。金乌贼生命周期短, 产卵群体由补充群体组成, 易受环境因子的影响^[4], 捕捞活动导致的丰度波动也会由于其对环境因子的高敏感性而进一步加剧^[24]。因此, 在今后的研究中综合考虑环境因子和捕捞压力对探究金乌贼丰度变化的影响是十分必要的。

3.2 金乌贼渔场的时空分布

金乌贼在我国近海的主要渔场包括日照岚山头、青岛、黄海中北部等海域^[16]。本研究发现, 山

东近海的金乌贼渔场主要分布于黄海中部的海州湾以及青海渔场,这一结论与以往的金乌贼空间分布研究结果相符^[15]。在中国沿海产卵的金乌贼可分为两个地理种群:一个在舟山、长江口海域产卵,另一个在山东省东南近岸水域产卵^[25]。海州湾渔场及青海渔场则处于山东省东南近岸水域,为中国沿海金乌贼的重要产卵场,资源量相对较高。关于 2018—2023 年山东近海金乌贼渔场重心北移的驱动因素, Xu 等^[16]认为,水温的上升可能会使得金乌贼的空间分布向北移动。这一观点与 Pang 等^[26]的研究结果相吻合,其研究表明,黄海水域的水温自 20 世纪 50 年代以来总体上呈波动上升趋势。此外, Guo 等^[27]的研究进一步表明,近几十年南黄海表面温度呈现上升的趋势,升温速率达 0.61 °C/10 年,证实了气候变化背景下黄海水域的持续升温现象。而王林龙等^[28]认为,金乌贼幼体发育后期可以主动规避高水温的负面影响,因此渔场重心北移可能是金乌贼对水温上升的适应性行为。此外,渔场重心的年间变化也可能与金乌贼增殖放流活动有关。据以往研究,增殖放流的实施使得烟威沿海地区金乌贼资源量明显增多^[5],表明增殖放流作为一种资源补充手段能够对金乌贼的种群动态和空间分布格局产生一定影响。未来的研究需要进一步明确增殖放流的具体位置、规模及其与生态环境变化的交互作用,以更准确地评估增殖放流对金乌贼分布和渔场变化的作用机制。从渔场重心的月间变化来看,9—11 月金乌贼渔场重心自黄海中部的西北近岸向东南远海的方向移动,与之前的研究结论相符^[29]。秋季由于水温逐渐降低,加之幼体活动能力逐渐增强,金乌贼的补充群体由近岸产卵场逐渐向东南方向深水区移动扩散,为越冬洄游做准备,符合山东近岸金乌贼的洄游分布习性^[30-31]。

渔场重心和 CPUE 分布是渔业资源分布研究中的两个重要指标。其中 CPUE 分布更能准确反映渔业资源的实际分布和丰度,是指导短期内渔业生产的主要依据。而从长期来看,渔场重心的变化能反映出渔场环境和渔业资源分布的变化趋势,可作为渔业管理部门制定长期的渔业发展规

划、资源保护策略以及渔场开发计划的重要参考依据^[32]。

3.3 环境因子对金乌贼 CPUE 的影响

有研究表明,头足类的成体主要受捕捞活动的影响,而在其生活史早期阶段则主要受到环境因素的强烈影响^[24]。本研究结果显示,山东近海金乌贼 CPUE 在底层水温为 16~22 °C 时较高。有研究发现,金乌贼群体偏好水温 20 °C 左右的栖息环境,较高水温可能会对其生长发育产生负面影响,它们主要分布在日本海和朝鲜海域等水温相对更低的海域^[16,33]。在盐度方面,有研究表明金乌贼倾向分布于盐度较高的水域^[15-16,34],且当水深为 27 m 左右时,资源丰度达到最大值^[15-16]。而本研究中深度响应曲线峰值点对应数值约为 28 m,并在水深小于 28 m 时,CPUE 呈现平缓上升趋势;此外盐度大于 30 时,CPUE 显著增大,进一步验证了前人的研究结果。本研究得到的自然环境下适宜金乌贼分布的底层水温区间与室内养殖的适宜水温范围(16~28 °C)基本一致。这表明在自然条件下,金乌贼的资源密度和捕捞效率在较为狭窄的温度范围内(16~22 °C)达到高峰。与金乌贼室内养殖适宜盐度范围(29~33)结果比较表明,自然环境中,金乌贼倾向于分布在盐度相对较高的海域^[35]。

3.4 捕捞压力对金乌贼 CPUE 的影响

金乌贼曾是黄海的主要渔获对象之一,1980 年代以后,太平洋褶柔鱼(*Todarodes pacificus*)逐渐取而代之,成为主要的经济头足类。针对金乌贼资源日益衰退的状况,山东省自 1991 年起实施了规模性的金乌贼增殖放流项目。然而,近年来尽管放流规模在不断扩大,金乌贼的资源量仅得到一定程度的补充,还尚未完全恢复。主要表现为,秋汛金乌贼产量有大幅增加,但春季产卵群体的数量仍较为匮乏^[5]。究其原因,渔业捕捞活动对其种群动态的影响不容忽视。伏季休渔结束后捕捞压力的迅速增大,使得金乌贼种群中只有少数个体能够成功抵达越冬场,同时高强度的捕捞压力也对翌年洄游产卵的亲体数量产生负面影响,从而大幅削弱了金乌贼种群的补充能力^[5,31]。本

研究结果也表明,较高的捕捞压力会对次年的金乌贼丰度产生较大的负面影响。此外,高强度的捕捞压力还可能会破坏金乌贼的栖息地^[26,34],影响其早期生命阶段的存活率,并削弱其群体补充能力,从而造成其资源量不能得到有效恢复。因此,合理规划商业性捕捞生产,加强金乌贼资源的科学养护和管理对其资源的可持续利用具有重要意义。

参考文献:

- [1] 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.]
- [2] Zhou J G, Chen X J, Liu B L. Notes on the present status of exploitation and potential of cephalopod resources on the world[J]. Marine Fisheries, 2008, 30(3): 268-275. [周金官, 陈新军, 刘必林. 世界头足类资源开发利用现状及其潜力[J]. 海洋渔业, 2008, 30(3): 268-275.]
- [3] Hao Z L, Zhang X M, Zhang P D. Biological characteristics and multiplication techniques of *Sepia esculenta*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(4): 601-606. [郝振林, 张秀梅, 张沛东. 金乌贼的生物学特性及增殖技术[J]. 生态学杂志, 2007, 26(4): 601-606.]
- [4] 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.]
- [5] 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.]
- [6] Perry R I, Cury P, Brander K, et al. Sensitivity of marine systems to climate and fishing: Concepts, issues and management responses[J]. Journal of Marine Systems, 2010, 79(3-4): 427-435.
- [7] Planque B, Fromentin J M, Cury P, et al. How does fishing alter marine populations and ecosystems sensitivity to climate[J]. Journal of Marine Systems, 2010, 79(3-4): 403-417.
- [8] Gissi E, Manea E, Mazari A D, et al. A review of the combined effects of climate change and other local human stressors on the marine environment[J]. Science of the Total Environment, 2021, 755: 142564.
- [9] Bartolino V, Margonski P, Lindegren M, et al. Forecasting fish stock dynamics under climate change: Baltic herring (*Clupea harengus*) as a case study[J]. Fisheries Oceanography, 2014, 23(3): 258-269.
- [10] Wood S N. Generalized Additive Models: An Introduction with R[M]. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [11] Wang H Z, Dai X J, Guan W J, et al. Relationship between the environmental factors and the CPUE (catch per unit effort) of *Pseudocarcharias kamoharai* in tropical Atlantic Ocean based on the GAM-Tweedie model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(6): 2024-2032. [王浩展, 戴小杰, 官文江, 等. 基于 Tweedie-GAM 模型的热带大西洋拟锥齿鲨单位捕捞努力量渔获量与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 2024-2032.]
- [12] Zhang Y L, Xu B D, Zhang C L, et al. Relationship between the habitat factors and the abundance of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) in Haizhou Bay based on the Tweedie-GAM model[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(12): 78-89. [张云雷, 徐宾铎, 张崇良, 等. 基于 Tweedie-GAM 模型研究海州湾小黄鱼资源丰度与栖息环境的关系[J]. 海洋学报, 2019, 41(12): 78-89.]
- [13] Jian Y, Zhang Y L, Ding Z C, et al. Relationship between habitat factors and abundance of *Sillago* species eggs determined with Tweedie-GAM model[J]. Periodical of Ocean University of China, 2022, 52(9): 43-53. [简盈, 张云雷, 丁兆成, 等. 基于 Tweedie-GAM 模型的鳮属鱼类鱼卵丰度与栖息环境的关系研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(9): 43-53.]
- [14] Ma W, Qin S, Gao C X, et al. Distribution of Japanese scad (*Decapterus maruadsi*) and its relationship with environmental factors in the coast waters of southern Zhejiang based on the Tweedie-GAM[J]. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(3): 12-22. [马稳, 秦松, 高春霞, 等. 基于 Tweedie-GAM 探究浙江南部近海蓝圆鲹资源分布及与环境因子的关系[J]. 渔业科学进展, 2023, 44(3): 12-22.]
- [15] Jiang Y, Zhang Y L, Pang Z W, et al. Spatial distribution characteristics of *Sepia esculenta* in Haizhou Bay and adjacent waters and their relationship with environmental factors[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(4): 617-624. [姜月, 张云雷, 逢志伟, 等. 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[J]. 水生生物学报, 2024, 48(4): 617-624.]
- [16] Xu M, Yang L L, Liu Z L, et al. Seasonal and spatial distribution characteristics of *Sepia esculenta* in the East China Sea Region: Transfer of the central distribution from 29° N to 28° N[J]. Animals, 2024, 14(10): 1412.
- [17] Liu Y X, Liu Y M. An indoor artificial propagation technique for golden 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.]
- [18] Liu X X, Wang J, Zhang Y L, et al. Comparison between two GAMs in quantifying the spatial distribution of *Hexagrammos otakii* in Haizhou Bay, China[J]. Fisheries Research, 2019, 218: 209-217.
- [19] Hastie T J, Tibshirani R J. Generalized Additive Models[M]. London: Chapman and Hall, 1990.
- [20] Tweedie M C K. An Index Which Distinguishes Between Some Important Exponential Families[M]// Ghosh J K, Roy J. Statistics: Applications and New Directions: Proceedings of the Indian Statistical Institute Golden Jubilee International Conference. Calcutta: Indian Statistical Institute, 1984: 579-604.
- [21] Berg C W, Nielsen A, Kristensen K. Evaluation of alternative age-based methods for estimating relative abundance from survey data in relation to assessment models[J]. Fisheries Research, 2014, 151: 91-99.
- [22] Akaike H. A new look at the statistical model identification[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 716-723.
- [23] Dai L, Yin J H, Wu L C. Mixture of expert regression for joint mean and dispersion models based on the Tweedie distribution family[J]. Mathematica Applicata, 2018, 31(1): 168-176. [戴琳, 尹军辉, 吴刘仓. Tweedie 类分布下广义线性联合均值与散度混合专家回归模型[J]. 应用数学, 2018, 31(1): 168-176.]
- [24] Keller S, Valls M, Hidalgo M, et al. Influence of environmental parameters on the life-history and population dynamics of cuttlefish *Sepia officinalis* in the western Mediterranean[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 145: 31-40.
- [25] Zheng Y J, Chen X Z, Cheng J H, et al. Biological Resources and Environment in the East China Sea Continental Shelf[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2003: 722-727. [郑元甲, 陈雪忠, 程家桦, 等. 东海大陆架生物资源与环境[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003: 722-727.]
- [26] Pang Y M, Tian Y J, Fu C H, et al. Variability of coastal cephalopods in overexploited China Seas under climate change with implications on fisheries management[J]. Fisheries Research, 2018, 208: 22-23.
- [27] Guo S J, Sun X X, Zhang J, et al. Unveiling the evolution of phytoplankton communities: Decades-long insights into the southern Yellow Sea, China (1959-2023)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2024, 201: 116179.
- [28] Wang L L, Zhang X M, Wang Z, et al. Morphological characteristics and genetic differentiation of a breeding population of *Sepia esculenta* in Qingdao[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(2): 342-352. [王林龙, 张秀梅, 王展, 等. 青岛近岸金乌贼繁殖群体形态特征及遗传分化[J]. 中国水产科学, 2019, 26(2): 342-352.]
- [29] 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.]
- [30] Li J Y. Group reproduction and migratory of *Sepia esculenta* Hoyle in the Yellow Sea and the Bohai Sea[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1963(2): 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(2): 69-108.]
- [31] Zhang X M, Wang L L, Zhang Y Y, et al. Strategy optimization of stock enhancement of golden cuttlefish, (*Sepia esculenta*) based on structural characteristics of reproductive and recruitment populations[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 1890-1899. [张秀梅, 王林龙, 张宇洋, 等. 基于繁殖群体与补充群体结构特征的金乌贼资源增殖策略优化[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1890-1899.]
- [32] Cai J D, Chen F P, Wu J S, et al. The theoretical construction of measuring fishing ground gravity reliability and correcting fishing ground gravity: A case study on *Paerargyrops edita* Tanaka in Minnan-Taiwan Bank Fishing Ground[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1929-1937. [蔡建堤, 陈方平, 吴建绍, 等. 渔场重心信度测算及渔场重心修正理论构建——以闽南-台湾浅滩渔场二长棘鲷为例[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1929-1937.]
- [33] Robinson C J, Gómez-Gutiérrez J, de León D A S. Jumbo squid (*Dosidicus gigas*) landings in the Gulf of California related to remotely sensed SST and concentrations of chlorophyll a (1998-2012)[J]. Fisheries Research, 2013, 137: 97-103.
- [34] 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, 32. [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, 32.]
- [35] Feng A X, Ji B A, Sun C F, et al. Artificial propagation and culture technique for 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.]

Distribution of *Sepia esculenta* fishery in Shandong coastal waters and its relationship with fishing and environmental factors

JIANG Yue¹, ZHANG Chongliang^{1,2}, XU Binduo^{1,2}, JI Yupeng^{1,2}, REN Yiping^{1,2}, XUE Ying^{1,2*}

1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Field Observation and Research Station of Haizhou Bay Fishery Ecosystem, Ministry of Education, Qingdao 266003, China

Abstract: As an important fishery resource in the offshore waters of Shandong Province, the fishing ground distribution of *Sepia esculenta* and its relationships with influencing factors have attracted much attention. This study constructed a generalized additive model (GAM) based on Tweedie distribution to analyze the distribution characteristics of *Sepia esculenta* fishing grounds in the offshore waters of Shandong Province and their relationships with fishing pressure and environmental factors, using monitoring data of fishery production from 2018 to 2023. The results showed that *Sepia esculenta* fishing grounds are mainly distributed in the Haizhou Bay fishing grounds and Qinghai fishing grounds in the central Yellow Sea. The center of gravity of the fishing grounds for *Sepia esculenta* tended to shift northwards annually, and showed a trend moving from northwest to southeast monthly. Through model comparison, the Tweedie GAM model, which includes fishing, environmental, and time factors, had the best fitting effect and predictive performance. Sea bottom salinity, sea bottom temperature, and depth that are suitable for the distribution of *Sepia esculenta* in autumn are 31–34, 16–22 °C, and approximate 28 m, respectively. The fishing effort of the current year had a positive effect on the catch per unit effort (CPUE) of *Sepia esculenta*, while the fishing effort of the previous year had a negative effect. This study revealed the impact of external driving factors on the distribution of *Sepia esculenta* resources, which is of great significance for the rational planning of commercial fishing production, strengthening the scientific management and resource conservation of *Sepia esculenta*.

Key words: *Sepia esculenta*; fishery distribution; Shandong Province offshore waters; generalized additive model; Tweedie-like distribution

Corresponding author: XUE Ying. E-mail: xueying@ouc.edu.cn