

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20220224002

http://www.yykxjz.cn/

马稳, 秦松, 高春霞, 唐未, 马金, 赵静. 基于 Tweedie-GAM 探究浙江南部近海蓝圆鲈资源分布及与环境因子的关系. 渔业科学进展, 2023, 44(3): 12-22

MA W, QIN S, GAO C X, TANG W, MA J, ZHAO J. Distribution of Japanese scad (*Decapterus maruadsi*) and its relationship with environmental factors in the coast waters of southern Zhejiang based on the Tweedie-GAM. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(3): 12-22

基于 Tweedie-GAM 探究浙江南部近海 蓝圆鲈资源分布及与环境因子的关系*

马 稳¹ 秦 松² 高春霞^{1,3} 唐 未¹ 马 金^{1,3} 赵 静^{4①}

- (1. 上海海洋大学海洋科学学院 上海 201306; 2. 浙江省海洋水产养殖研究所 浙江 温州 325005;
3. 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室 上海 201306;
4. 上海海洋大学海洋科学研究院 上海 201306)

摘要 本研究根据 2015—2020 年浙江南部近海水域渔业资源数据, 利用 Tweedie-GAM 研究了春季、夏季、秋季 3 个季节蓝圆鲈(*Decapterus maruadsi*) 的分布特征及其与海洋环境因子之间的关系。结果显示, 蓝圆鲈在不同季节的空间分布存在显著差异, 在春季主要集中在沿岸水域, 在夏季主要集中在浙江南部近海的南、北两侧, 呈现“两边高、中间低”的分布格局, 秋季主要集中在研究海域的向海一侧水域。蓝圆鲈在不同季节的关键环境因子存在一定差异。春季, 在 19.5~25.0 °C 范围内, 资源密度随海水温度的升高呈现先增加后减小的趋势, 在 22.7 °C 达到峰值。夏季, 分别在海水温度 28.0 °C 和 30.3 °C 取得高峰值和低值, 同时, 盐度为 32.3 时资源密度达到最大值。秋季, 资源密度随着盐度的增加呈先减小后增加的趋势, 在盐度 29.8 处取得最小值; 资源密度和水深之间存在非线性关系, 总体呈先增加后基本稳定的趋势。本研究揭示了蓝圆鲈的时空分布特征及与环境因子之间的关系, 为浙江南部近海蓝圆鲈的养护管理与可持续利用提供了科学依据。

关键词 蓝圆鲈; Tweedie-GAM; 资源分布; 环境因子; 浙江南部近海

中图分类号 S931.41 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2023)03-0012-11

研究鱼类的空间分布对于了解海洋生态系统的动态变化至关重要(Liu *et al*, 2019)。近年来, 环境驱动的变化对海洋物种的空间分布、丰度以及相关生境适宜性的影响引起了广泛关注(赵静等, 2013; Zhao *et al*, 2021; Long *et al*, 2021)。物种分布模型(species distribution models, SDMs), 也被称为环境生态位模型, 在生态研究、保护以及量化物种与栖息地之间的关系中发挥着重要的作用(Yu *et al*, 2020)。然而, 由

于资源衰退、鱼群的聚集性和采样调查等原因, 渔业调查数据中会存在零值的情况(Maunders *et al*, 2004)。在建模时如果忽略这种现象, 可能会对模型参数估计错误, 从而导致渔业资源量指标与环境因子之间的关系的错误估计(Perumean-Chaney *et al*, 2013)。

蓝圆鲈(*Decapterus maruadsi*)为暖水性中上层鱼类, 分布于中国、日本、朝鲜和韩国的近岸水域, 在我国台湾海峡和浙江南部近海资源较为丰富(张秋华

* 国家自然科学基金项目(31902372)和浙江省渔业资源专项调查项目(158053)共同资助。马 稳, E-mail: ma1997wen@163.com

① 通信作者: 赵 静, E-mail: jzhao@shou.edu.cn

收稿日期: 2022-02-24, 收修改稿日期: 2022-03-31

等, 2007; 崔明远等, 2020), 具有洄游距离长、补充速度快等特征, 但极易受到海洋捕捞强度和海洋环境影响(Zhao *et al.*, 2021)。近年来, 受水域污染、过度捕捞等因素影响, 蓝圆鲈资源处于较低水平(Zhao *et al.*, 2021), 同时, 由于蓝圆鲈为季节洄游性鱼类, 由此造成许多调查站点出现采样零值的情况, 这给基于模型手段的探索渔业资源量与环境因子之间关系的研究带来应用与挑战。在资源低水平状况下, 准确了解蓝圆鲈种群动态以及资源分布情况应更加注重模型方法的选择, 这将有助于掌握其资源分布动态, 为蓝圆鲈的可持续利用提供科学研究支撑。

浙江南部近海位于我国东海中南部, 在台湾暖流、闽浙沿岸水等多种海流水团的共同影响下, 营养盐和浮游生物充足, 渔业资源较为丰富(王玉衡等, 1990; 张秋华等, 2007), 是蓝圆鲈重要的产卵场与索饵场(张秋华等, 2007)。因此, 准确了解浙江南部近海渔业资源密度与环境因子之间的关系以及浙江南部近海鱼类种群的生活习性, 对渔业资源评估与管理策略评价具有重要意义。本研究基于 2015—2020 年渔业资源独立调查数据, 应用 Tweedie-GAM 探究了浙江南部近海蓝圆鲈资源密度分布与环境因子的关系, 以期对浙江南部近海渔业资源的养护管理与可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

蓝圆鲈样品采自浙江南部近海及其邻近海域 (120.93°E~122.95°E, 27.21°N~28.97°N), 于 2015—

2020 年的 5 月(春季)、8 月(夏季)和 11 月(秋季)开展渔业资源调查和水文环境调查(图 1)。调查船网板类型为飞碟型铸铁, 总吨位 800 t, 主机功率为 403 kW, 调查网具为底拖网, 网具全长约 95 m, 高 7.5 m, 网口宽 40 m, 网囊网目 2 cm, 拖速为 2~4 kn, 每个站点的作业时间为 1 h。本调查采用系统定点站位采样, 共设置 27 个站点, 在每个调查站点同步使用 WTW-Multi 3430 型号水质分析仪, 对水深 0.5 m 的海水温度、盐度环境数据进行采集, 研究区域的环境数据统计值如表 1 所示。水质样品的采集、测定和分析依据《海洋调查规范—海洋生物调查》(GB/T 12763.6-2007)和《海洋监测规范》(GB 17378.3-2007)进行。在进行数据分析前, 对调查数据进行拖速 3 kn 和拖时 1 h 的标准化处理, 采用单位时间内的渔获尾数(ind./h)作为蓝圆鲈的资源密度。

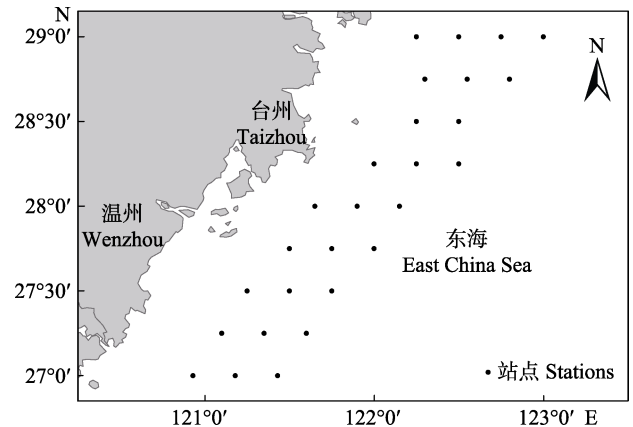


图 1 浙江南部近海鱼类资源以及水文环境调查站点
Fig.1 Distribution of fish resources and hydrological environment sampling stations in coast waters south of Zhejiang

表 1 浙江南部近海数据统计值
Tab.1 Statistics of data in coast waters south of Zhejiang

季节 Season	资源密度和环境因子 Resource and environment factors	平均值 Average	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum	最大值 Maximum
春季 Spring	资源密度 Resource density /(ind./h)	310.88	1906.12	0.00	19107.00
	水深 Water depth /m	48.99	13.08	17.00	70.43
	海水温度 Seawater temperature /°C	22.62	1.04	19.60	25.20
	盐度 Salinity	30.80	1.86	26.30	34.20
夏季 Summer	资源密度 Resource density /(ind./h)	39.20	64.20	0.00	300.00
	水深 Water depth /m	48.95	12.60	19.00	69.30
	海水温度 Seawater temperature /°C	29.25	0.99	26.10	33.60
	盐度 Salinity	33.24	1.15	29.00	34.50
秋季 Autumn	资源密度 Resource density /(ind./h)	10.50	48.17	0.00	502.00
	水深 Water depth /m	49.22	13.25	17.60	71.99
	海水温度 Seawater temperature /°C	21.68	1.53	16.60	23.90
	盐度 Salinity	31.90	2.34	24.30	34.70

1.2 模型解释变量的选择

鉴于蓝圆鲈为洄游性鱼类,在不同季节存在明显的时空分布差异(何露雪等, 2023),因此,选择经度、纬度、离岸距离作为蓝圆鲈的空间分布影响因子。由于海水温度会影响浙江南部近海蓝圆鲈的生长发育(崔明远等, 2020);盐度、水深对蓝圆鲈的分布具有重要的影响(Zhao *et al.*, 2021),因此,选择海水温度、盐度和水深作为影响鱼类分布的水文环境影响因子。

在建立模型之前通过方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)排除高度相关的解释变量,以避免共线性影响模型精度(Dai *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2020)。使用 R 语言软件(V4.0.2)“car”软件包中的 vif 函数确定 VIF 值。一般认为,当 VIF>10 时,存在多重共线性问题(Bui *et al.*, 2011; Hua *et al.*, 2019)。

1.3 Tweedie-GAM 的构建

广义加性模型(generalized additive model, GAM)可以在不进行参数估计的前提下,用于探索因变量与自变量之间的非线性关系(Bellido *et al.*, 2001)。由于 GAM 使用较为灵活,目前已被广泛应用在渔业领域(Liu *et al.*, 2019、2021; 何露雪等, 2023)。英国统计学家 Tweedie (1984)首次提出了一种指数散布族分布中的一类特殊的概率分布,该种分布被称为 Tweedie 分布,用于处理非负、偏态的随机变量,通常用 $Tw_p(\theta, \varphi)$ 来表示,并由方差函数 $V(\mu)=\mu^p$ 完全确定,其中, θ 为规范参数; φ 为分散参数; $p \in (-\infty, 0) \cup [1, +\infty)$ 。Tweedie 类分布对应了几个常见重要分布: $p=0$ 、1、2、3, 分别对应于正态分布、泊松分布、伽玛分布和逆高斯分布。当 p 值介于 1~2 之间时,该分布为复合泊松-伽玛分布(Tanaka *et al.*, 2019),可以用于处理存在大量零值的非负值数据(Berg *et al.*, 2014)。1< p <2 时,概率密度方程为(Shono, 2008):

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

式中, θ 为规范参数, φ 为分散参数, p 为能效参数, $d(y; \theta, p)$ 为单位偏差。

GAM 能够拟合响应变量和解释变量之间的非线性关系,其表达式为:

$$g(Y) = \alpha + \sum_{j=1}^p f_j(X_j) + \varepsilon \quad (2)$$

式中, Y 为蓝圆鲈资源密度(ind./h); 函数 $g(Y)$ 为链接函数(link function), 本研究链接函数选为自然对数; f_j 是平滑函数(样条平滑或 loess 平滑)。本研究采用样

条平滑函数; x_j 为自变量,即每个站点的环境因子, $f_j(X_j)$ 用于描述 $g(Y)$ 和解释变量 x_j 关系平滑功能函数; α 代表拟合模型中的截距, ε 为均值为零且符合正态分布随机误差项;误差分布选择为 Tweedie 分布。

本研究建立的 Tweedie-GAM 为:

$$\begin{cases} Y \sim Tw_p(\theta, \varphi) \\ \mu = E(Y) \\ \ln(\mu) = X\gamma + s(X_1) + s(X_2) + \dots + s(X_n) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\mu = E(Y)$ 为不同季节蓝圆鲈资源密度的期望值;解释变量中, X 为线性部分的影响因子的指示变量, γ 是相应的待估计参数, s 为自然样条平滑函数, X_n 为第 n 个解释变量,包括海水温度、盐度、水深、离岸距离等环境因子。

1.4 模型的选择

选择赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)衡量多组模型的拟合优度(Planque *et al.*, 2007), AIC 值越小,模型的拟合程度越好。其中,赤池信息准则的计算方法如下:

$$AIC = 2k - 2 \ln L \quad (4)$$

式中, k 为参数个数, L 为似然函数。

本研究通过对筛选后的环境因子进行排列组合,建立环境因子与资源密度之间的 GAM,选择 AIC 值最小的模型为最佳模型。此外,本研究通过 F 检验评估预测变量对解释变量影响的显著程度。

本研究所有统计分析均在 R 语言软件(V4.0.2)进行, Tweedie-GAM 通过“mgcv”包实现(Wood *et al.*, 2016); 站位图以及资源分布图均采用 Arcmap 10.8 软件绘制。

2 结果

2.1 蓝圆鲈资源密度时空分布

本研究通过使用 2015—2021 年不同季节蓝圆鲈资源密度的平均值绘制其资源空间分布图(图 2),发现不同季节呈现出不同分布规律,其中,春季资源密度明显高于夏季和秋季。春季,蓝圆鲈主要分布在 28°N 以南和 29°N 的近岸水域;较春季而言,夏季蓝圆鲈的时空分布格局发生较为明显的变化,主要集中在 28°45'N 以北和 27°45'N 以南海域;秋季,蓝圆鲈资源密度的分布格局与春季相反,呈现出向海一侧水域大于近岸水域的分布特征,主要分布在 28°N 及以北的外海水域(图 2)。

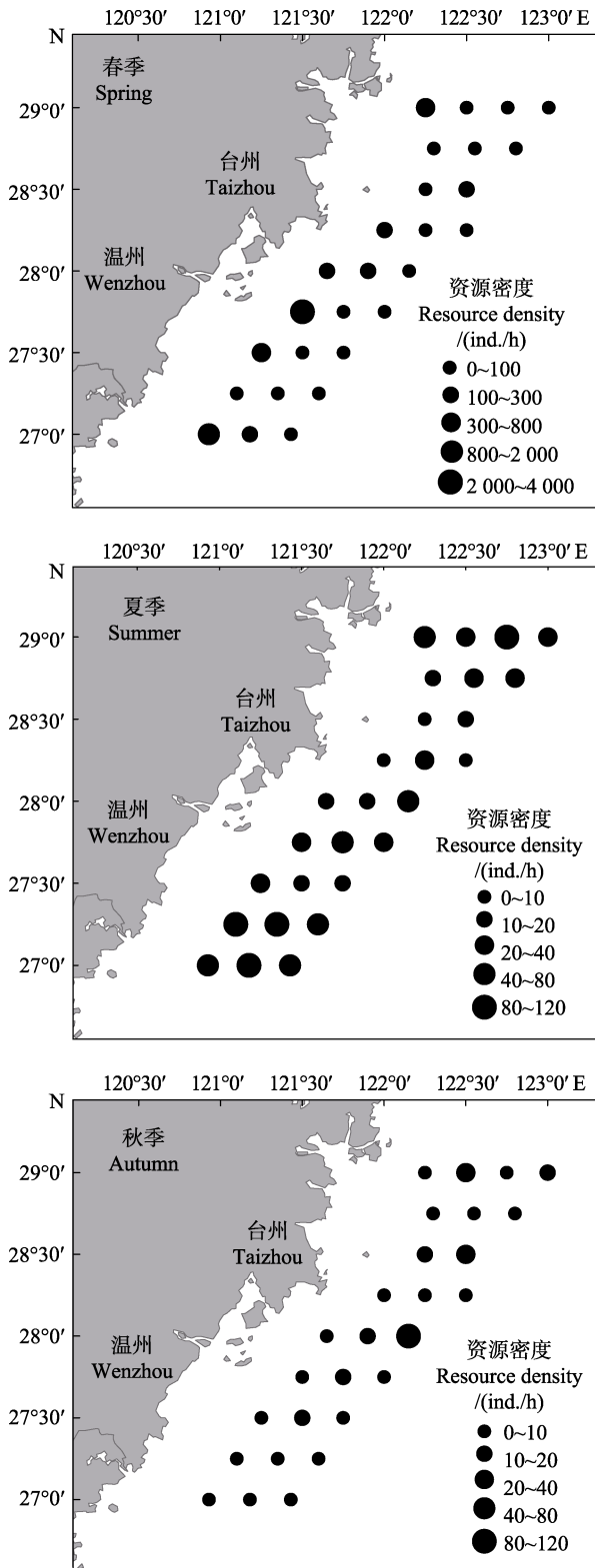


图 2 2015—2020 年春季、夏季和秋季浙江南部近海蓝圆鲈分布

Fig.2 Distribution of *D. maruadsi* in the coastal waters of southern Zhejiang in spring, summer and autumn from 2015 to 2020

2.2 解释变量的筛选

纬度和经度的 VIF 值 >10, 盐度、离岸距离等其余 4 个环境因子 VIF 值均 <10, 分别移除经度、纬度再次进行共线性检验后, VIF 值均 <10 (表 2)。因此, 分别建立经度、纬度与其他环境因子的 GAM。

2.3 最优模型的选择

通过计算得出 3 个季节 Tweedie 分布中的 $Tw_p(\theta, \varphi)$ 能效参数 p 分别为 1.747、1.534 和 1.524。由于 $1 < p < 2$, 相应 3 个季节均服从复合泊松分布。本研究通过将不存在共线性的因子进行排列组合, 分别建立模型。不同季节最佳的 Tweedie-GAM 依次为:

a. 春季:

$$g(Y) = \alpha + s(T) + s(S) + s(\text{distance}) + s(\text{Lon}) + \varepsilon$$

b. 夏季:

$$g(Y) = \alpha + s(T) + s(S) + s(\text{depth}) + s(\text{Lat}) + \varepsilon$$

c. 秋季:

$$g(Y) = \alpha + s(T) + s(S) + s(\text{depth}) + s(\text{Lat}) + \varepsilon$$

式中, T 为海水温度, S 为盐度, distance 为离岸距离, Lat 为纬度, Lon 为经度, g 为链接函数。

蓝圆鲈最佳 GAM 及各影响因子的相关参数显示 (表 3), 春季影响蓝圆鲈资源分布的变量为海水温度、盐度、离岸距离和经度, 累计偏差解释率为 62.3%, 其中, 海水温度的贡献率最大, 为 30.8%, 其次是经度、离岸距离和盐度, 分别为 17.3%、10.3% 和 3.9%; 夏季影响蓝圆鲈资源分布的变量为海水温度、盐度、水深和纬度, 累计偏差解释率为 46.5%, 其中, 海水温度的贡献率最大, 为 35.8%, 其次是纬度、盐度和水深, 分别为 5.0%、3.8% 和 1.9%; 秋季影响蓝圆鲈资源分布的变量为海水温度、盐度、水深和纬度, 累计偏差解释率为 59.0%, 其中, 海水温度的贡献率最大, 为 21.2%, 其次是盐度、水深和纬度, 分别为 17.0%、15.6% 和 5.2%。

2.4 环境因子对蓝圆鲈资源分布的影响

春季, 蓝圆鲈的资源密度随经度的增加而减小, 经度与资源密度之间存在负相关关系; 在 19.5~25.0 °C 海水温度范围内, 资源密度呈先增加后减小的趋势, 在 22.7 °C 时达到峰值; 在盐度为 26~34 的范围内, 盐度和资源密度之间呈非线性关系, 当盐度 <31 时, 资源密度随着盐度的增加而逐渐增加, 当盐度 >31 时, 资源密度基本保持不变, 不再随着盐度的增加而逐渐增加; 离岸距离和资源密度之间存在负向非线性关系 (图 3)。

表2 模型解释变量共线性检验
Tab.2 Collinearity test of explanatory variables

季节 Season	方差膨胀因子 VIF						剔除的因子 Removing factor
	海水温度 <i>T</i>	盐度 <i>S</i>	水深 Depth	离岸距离 Distance	经度 Lon	纬度 Lat	
春季 Spring	1.40	1.88	5.25	4.25	43.80	36.10	
	1.38	1.85	3.78	2.78	1.57	—	纬度 Lat
	1.38	1.87	3.35	2.92	—	1.29	经度 Lon
夏季 Summer	1.06	1.54	3.91	4.74	42.83	37.80	
	1.02	1.42	3.05	2.36	1.89	—	纬度 Lat
	1.03	1.49	2.73	2.61	—	1.67	经度 Lon
秋天 Autumn	1.71	2.35	4.70	4.28	38.68	30.91	
	1.71	2.34	4.26	1.67	1.61	—	纬度 Lat
	1.71	2.35	3.99	1.84	—	1.29	经度 Lon

注：“—”表示移除该因子。

Note: the “—” denotes removing this factor.

表3 不同季节最优 GAM 中各影响因子的相关参数
Tab.3 Parameters of each factors in the optimal GAM model for each season

季节 Season	最佳模型 Optimal model	自由度 Degree of freedom	<i>P</i> 值 <i>P</i> value	累计偏差解释率 Accumulation of deviance explanation/%	因子偏差解释率 Deviance explanation of each factor /%	赤池信息 准则 AIC
春季 Spring	海水温度 <i>T</i>	4.238	<0.001***	26.9	26.9	1 097.00
	盐度 <i>S</i>	2.645	0.08	33.8	6.9	
	经度 Lon	1.001	<0.001***	47.6	13.8	
	离岸距离 distance	3.800	<0.001***	56.9	9.3	
夏季 Summer	海水温度 <i>T</i>	4.524	<0.001***	35.8	35.8	878.79
	纬度 Lat	3.595	0.02*	40.8	5.0	
	盐度 <i>S</i>	2.686	0.07	44.6	3.8	
	水深 depth	1.001	0.09	46.5	1.9	
秋季 Autumn	水深 depth	2.697	0.25	24.6	24.6	622.72
	海水温度 <i>T</i>	1.000	0.19	27.9	3.3	
	盐度 <i>S</i>	5.052	0.01*	39.0	11.1	
	纬度 Lat	2.684	0.19	43.7	4.7	

注：*为 $P<0.05$ ，**为 $P<0.01$ ，***为 $P<0.001$ 。

Note: *: $P<0.05$, **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$.

夏季,蓝圆鲈资源密度随纬度增加呈先减小后增大的趋势,纬度为 28.5°N 时资源密度达到最小值,纬度 $28.5\sim 29.0^{\circ}\text{N}$ 范围内对资源密度具有明显的正效应;海水温度在 $26\sim 34^{\circ}\text{C}$ 范围内,与资源密度呈多波状非线性关系,呈先增加后减小再增加的趋势,分别在 28.0°C 和 30.3°C 时取得高峰值和低值;盐度和资源密度之间呈单峰状关系,盐度为 32.3 时达到最大值;水深在 $20\sim 70\text{m}$ 范围内,与资源密度之间存在正相关的线性关系,呈现资源密度随着水深的增加而增加的趋势(图4)。

秋季,蓝圆鲈资源密度随纬度的增加呈先增加后平缓下降的趋势,当纬度为 27.8°N 时资源密度最大;资源密度随着海水温度的增加而逐渐减小,二者之间存在负向线性关系;盐度在 $29.0\sim 34.5$ 范围内,资源密度随着盐度的增加呈先减小后增加的趋势,并在盐度 29.8 达到最小值,这种变化趋势与资源密度和纬度之间的变化趋势相反;在水深 $20\sim 70\text{m}$ 范围内,资源密度和水深之间呈多波状非线性关系,总体呈先增加后基本保持不变的趋势(图5)。

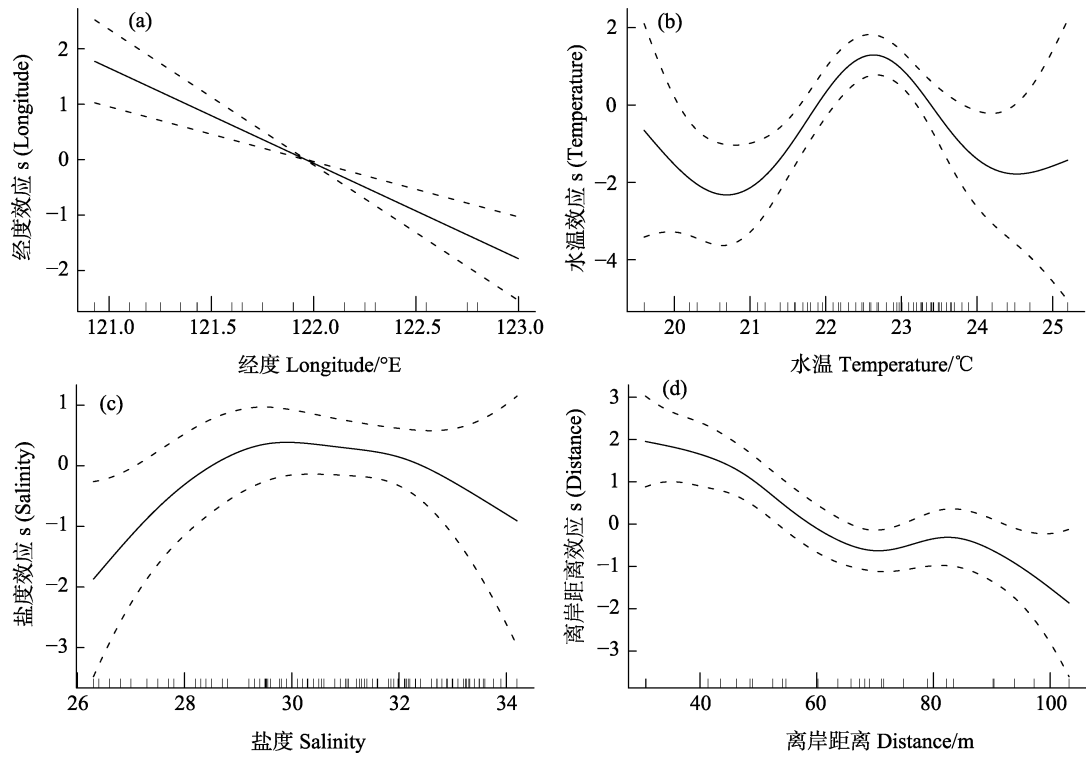


图 3 春季浙江南部近海蓝圆鲈资源密度与环境因子之间关系
 Fig.3 Relationship between resource density of *D. maruadsi* and environmental factors in coast waters of southern Zhejiang in spring

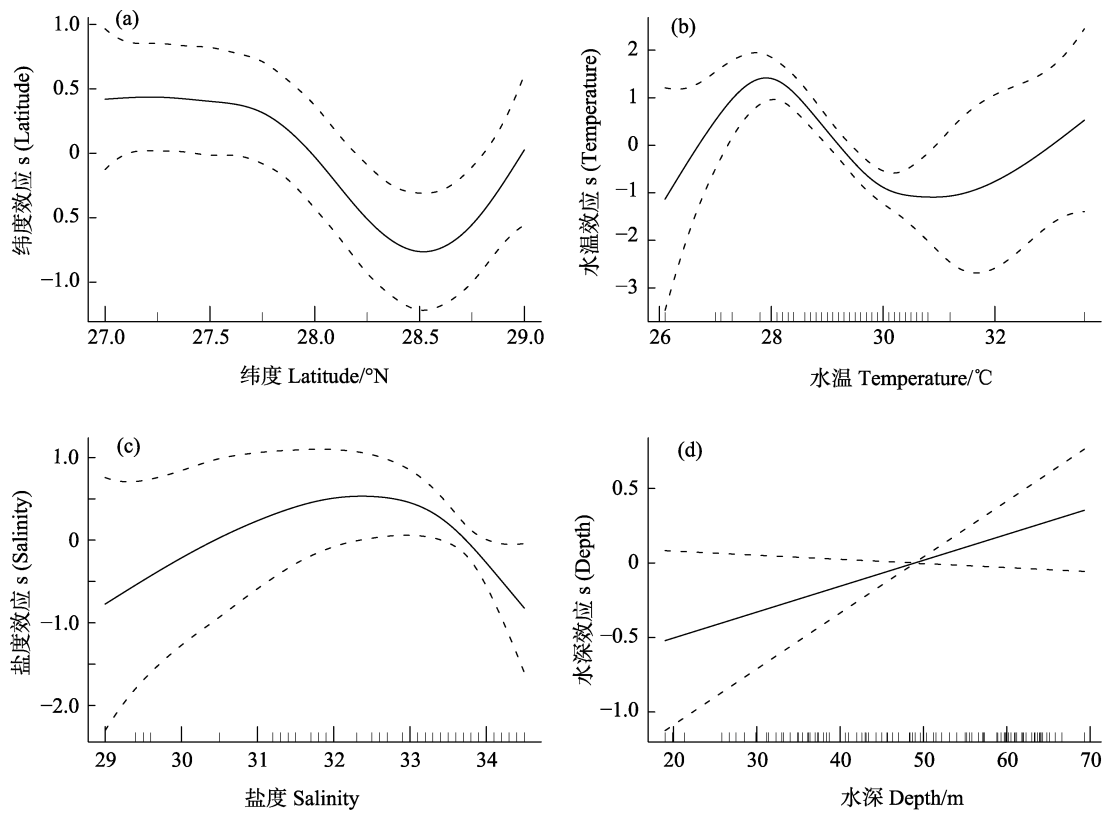


图 4 夏季浙江南部近海蓝圆鲈资源密度与环境因子之间的关系
 Fig.4 Relationship between resource density of *D. maruadsi* and environmental factors in coast waters of southern Zhejiang in summer

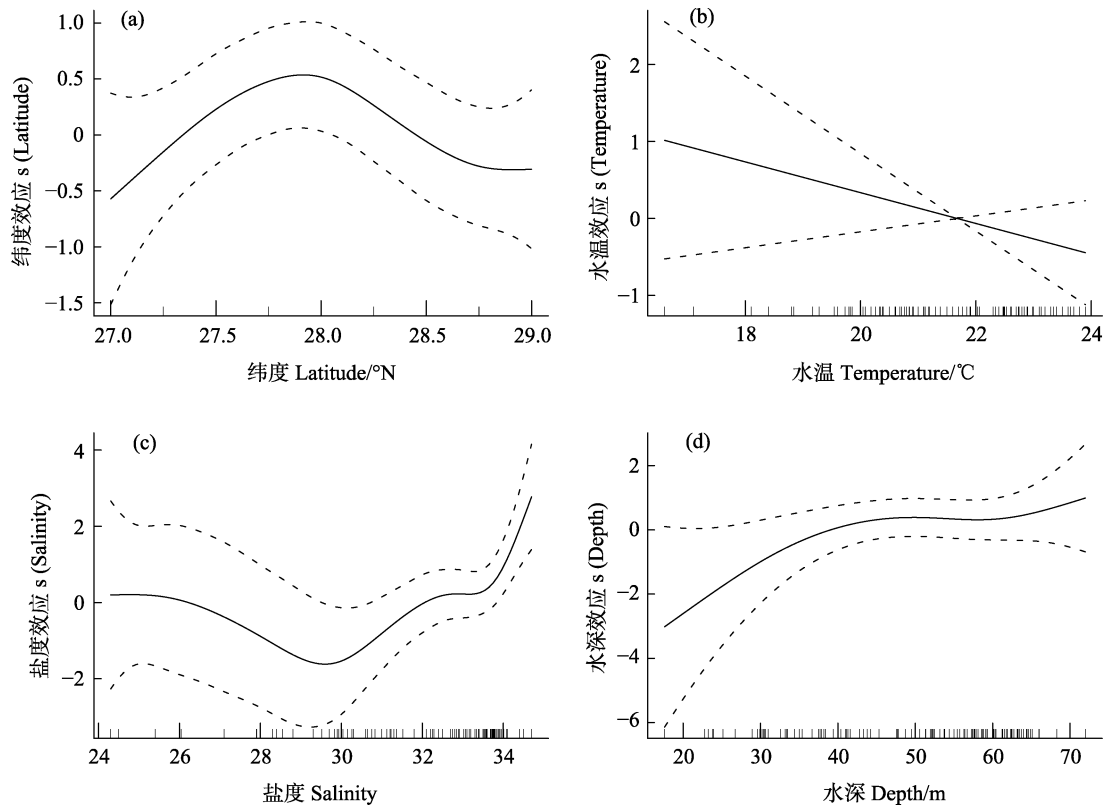


图5 秋季浙江南部近海蓝圆鲈资源密度与环境因子之间的关系
Fig.5 Relationship between resource density of *D. maruadsi* and environmental factors in coast waters of southern Zhejiang in autumn

3 讨论

3.1 浙江南部近海蓝圆鲈空间分布特征

蓝圆鲈季节性洄游习性与其时空分布特征密切相关(邓景耀等, 1991)。根据张秋华等(2007)对东海海域蓝圆鲈洄游群体的划分, 浙江南部海域蓝圆鲈应属于东海西部种群。同时, 浙江南部近海也是东海西部种群重要的产卵场和索饵场(郑元甲等, 2014; 张秋华等, 2007)。东海西部种群有2支越冬群体, 每年3月, 位于台湾海峡中南部深水区的越冬群体, 随着性腺逐渐成熟相继离开越冬场, 向西北方向作生殖洄游, 在福建近岸产卵后的亲鱼和幼鱼将在西南季风的影响下, 进入浙江近海海域索饵; 而另一支位于台湾北部海域越冬的群体, 也于3—4月, 分批聚集成群前往浙江近海作生殖洄游, 并在5—6月进入鱼山渔场(邓景耀等, 1991; 张秋华等, 2007; 郑元甲等, 2014)。本研究发现, 春季蓝圆鲈主要集中在近岸海域, 呈现出近岸水域的资源密度明显高于远岸水域的分布格局, 这可能是因为春季为蓝圆鲈产卵季节(何露雪等, 2023), 近岸海域的环境又相对复杂, 如暗礁、海沟

等, 加之近岸海域水流环境比较多样, 营养盐较为充足, 吸引了蓝圆鲈等鱼类在靠近近岸海域的位置产卵(陈伟峰等, 2017; 于南京等, 2020)。7—10月, 蓝圆鲈群体开始逐渐北上, 在浙江北部近海海域进行索饵活动, 常以斑块状聚集(张秋华等, 2007), 这或能解释夏季蓝圆鲈在浙江南部海域资源密度较高且呈现群聚现象。本研究发现, 在秋季, 北部水域资源密度明显高于南部水域(图2), 这可能是由于每年11月海水温度逐渐降低, 蓝圆鲈自北向南开始进行越冬洄游(郑元甲等, 2014), 还未抵达南部水域所导致。整体而言, 春季的资源密度明显高于夏季和秋季。本研究认为, 这主要由于春季东海西部种群的2支越冬群体在浙江南部海域分别进行索饵和产卵活动(张秋华等, 2007), 鱼类较为聚集, 至夏季和秋季, 鱼类开始进行洄游, 离开浙江南部海域(郑元甲等, 2014), 鱼类数量明显降低。

3.2 影响蓝圆鲈资源分布的环境因子

鱼类对各种环境因子的适应能力与地理环境、季节以及生长阶段关系密切, 同时鱼类在不同时期的最适生长环境也存在一定差异(张云雷等, 2019)。本研

究显示,海水温度和盐度均出现在3个季节的最佳模型中,因此,本研究认为,海水温度和盐度是影响浙江南部近海蓝圆鲈资源分布的重要的影响因子。

GAM 结果显示,海水温度是影响春季和夏季蓝圆鲈资源密度空间分布的最重要的环境因子之一(贡献率分别为 26.9%和 35.8%)。海水温度不仅能影响鱼类胚胎发育、生长、繁殖和新陈代谢(刘梦影等, 2020),还能通过改变饵料时空分布以及资源密度,间接影响鱼类的分布与洄游(Lewin *et al.*, 2014)。范江涛等(2018)研究表明,南海北部海域蓝圆鲈在春季和夏季的适温范围分别为 25.3~26.0 °C 和 29.0~29.7 °C,而本研究发现,浙江南部近海蓝圆鲈春季和夏季的适宜温度分别为 22~23 °C 和 27~29 °C,略低于其他海域,这可能与南北海域海水温度变化尺度较大以及调查时间有关,同时不同海域蓝圆鲈种群存在差异(张秋华等, 2007),从而对海水温度的适应范围也会产生一定的影响。虽然本研究春季的最适海水温度与范江涛等(2018)结果存在差异,但资源密度与海水温度之间的变化趋势基本相似,均呈先增加后减小的趋势,这可能是由于春季为蓝圆鲈的产卵季节,在一定范围内的海水温度升高能提高鱼类性腺的发育速度,从而使得产卵亲体的数量增加,同时也可作为幼鱼生长提供必要的环境条件(张云雷等, 2019),但当海水温度超过某一范围,海水温度的继续升高会降低排卵率以及胚胎的存活率,并影响成年鱼的数量(Zhao *et al.*, 2021)。

盐度在鱼类的生长发育中发挥着重要作用,通过渗透压影响鱼卵和幼鱼的存活率(Zhao *et al.*, 2021)。GAM 结果显示,盐度在3个季节中均会影响蓝圆鲈的空间分布,在3个季节(春季、夏季和秋季)中的偏差解释率分别为 3.9%、3.8%和 15.6%。与春季和夏季相比,盐度在秋季的最佳模型中有较高的偏差解释率,对鱼类分布起到更明显的作用。蓝圆鲈幼鱼通常出现在盐水和淡水的混合区域,成鱼往往出现在高盐水舌锋以内(朱德林等, 1984)。本研究中,蓝圆鲈秋季主要出现在浙江南部近海盐度为 32~34 的水域,其适宜栖息的盐度范围为 33~34。这与 Zhao 等(2021)研究的南海北部蓝圆鲈秋季的适盐范围为 32.9~34.0 以及东海蓝圆鲈幼鱼和成鱼的渔场通常位于高盐度水域(朱德林等, 1984)的结论基本一致。

本研究也表明,水深与夏季和秋季蓝圆鲈的分布关系密切。水深作为一个综合性影响因子,不仅可以直接反映出压力和光照强度的变化,还可以间接反映出海水温度、盐度、环境条件的变化(邱永松, 1996)。水深在秋季最佳模型中的解释率为 24.6%,对蓝圆鲈

资源分布有较为重要的作用。Hashim 等(2017)利用声学技术评估马来西亚东海岸 3 种商业远洋鱼类生物量时发现,蓝圆鲈最适栖息水深为 40~60 m;方水美等(2006)利用统计知识探索秋季闽南-台湾浅滩渔场资源空间分布时发现,蓝圆鲈主要集中在 30~60 m 水层;Zhao 等(2021)利用 GAM 探索春、秋季南海北部海域蓝圆鲈时空分布规律,发现秋季蓝圆鲈适宜栖息的水深为 50~70 m,资源密度在 62 m 水层时达到最大值。本研究通过 Tweedie-GAM 探索浙江南部近海不同季节蓝圆鲈分布特征时发现,在秋季蓝圆鲈栖息水深 35~70 m 的资源密度较高。与其他研究对比发现,本研究结论与其他研究结果基本一致,但存在略微差异,这可能与不同海域的地理环境、水动力和鱼类组成存在差异有关(王理想, 2009; 马稳等, 2022)。但整体而言,蓝圆鲈适宜栖息水深环境较为相似,这可能由于秋季为蓝圆鲈索饵季节(张秋华等, 2007),索饵群体以成鱼为主,对环境的适应能力较强,可以进入较深的海域进行索饵、摄食。

3.3 Tweedie-GAM

GAM 被广泛应用于探索渔业资源和环境影响因子的关系(赵静等, 2013; 马金等, 2020),但常规 GAM 的概率密度为对数正态分布或者伽玛分布,这些概率密度函数不允许 0 值的出现(张云雷等, 2019)。而在 Tweedie 分布中,参数 p 取不同值时对应不同的分布,对数据具有较强的适用性(孙维伟, 2014)。本研究中,蓝圆鲈在不同季节(春季、夏季和秋季)的比例分别为 28.7%、18.4%和 44.0%,能效参数 p 为 1.747、1.534 和 1.524,均介于 1~2 之间,符合 Tweedie 分布对零值数据处理的要求。相关研究表明,分析包含(较多)零值的因变量数据时,GAM 框架下的 Tweedie 分布要优于其他模型分布(Shono, 2008; Li *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2021),因此,本研究通过使用 Tweedie-GAM 能在一定程度上更准确地探索蓝圆鲈资源密度与环境因子的关系。

本研究虽然通过 Tweedie-GAM 揭示了影响浙江南部近海蓝圆鲈分布一些关键因子,但鱼类种群资源分布与环境因素之间的关系会随环境的变化而发生改变(Hua *et al.*, 2019)。同时,环境因子对鱼类资源密度以及空间分布的影响又相对复杂(Ma *et al.*, 2020),因此,在今后的研究中,还需结合蓝圆鲈的生活史、更多的环境因子以及环境的变化进行更加深入的分析,从而更加全面地揭示蓝圆鲈资源密度与环境因子的关系,以期更加全面分析浙江南部近海蓝圆鲈栖息的空间分布特征。

参 考 文 献

- BELLIDO J M, PIERCE G J, WANG J. Modelling intra-annual variation in abundance of squid *Loligo forbesi* in Scottish waters using generalized additive models. *Fisheries Research*, 2001, 52(1/2): 23–39
- 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. *Fisheries Research*, 2014, 151: 91–99
- BUI D T, LOFMAN O, REVHAUG I, *et al.* Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards*, 2011, 59(3): 1413–1444
- CHEN W F, PENG X, WANG Z H, *et al.* Community structure characteristics of fishes in the coastal area of south Zhejiang during autumn and winter. *Ocean Development and Management*, 2017, 34(11): 111–119 [陈伟峰, 彭欣, 汪振华, 等. 浙南近海秋冬季鱼类群落结构研究. *海洋开发与管理*, 2017, 34(11): 111–119]
- CUI M Y, CHEN W F, DAI L B, *et al.* Growth heterogeneity and natural mortality of Japanese scad in offshore waters of southern Zhejiang. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(12): 1427–1437 [崔明远, 陈伟峰, 戴黎斌, 等. 浙江南部海域蓝圆鲹生长异质性及死亡特征. *中国水产科学*, 2020, 27(12): 1427–1437]
- DAI L B, HODGDON C, TIAN S Q, *et al.* Comparative performance of modelling approaches for predicting fish species richness in the Yangtze River estuary. *Regional Studies in Marine Science*, 2020, 35: 101161
- DENG J Y, ZHAO C Y. *Marine fishery biology*. Beijing: Agricultural Press, 1991 [邓景耀, 赵传纲. *海洋渔业生物学*. 北京: 农业出版社, 1991]
- FAN J T, HUANG Z R, XU Y W, *et al.* Habitat model analysis for *Decapterus maruadsi* in South China Sea based on remote sensing data. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018(3): 142–147 [范江涛, 黄梓荣, 许友伟, 等. 基于遥感数据的南海北部近海蓝圆鲹栖息地模型分析. *海洋湖沼通报*, 2018(3): 142–147]
- FANG S M, YANG S Y. Studies on spatial distribution of round scad and common mackerel communities in Minnan-Taiwan Bank fishing ground. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2006, 25(3): 374–380 [方水美, 杨圣云. 闽南-台湾浅滩渔场蓝圆鲹和鲷鱼群聚空间分布的研究. *台湾海峡*, 2006, 25(3): 374–380]
- HASHIM M, AZIZ M F H A, HASSAN R B, *et al.* Assessing target strength, abundance, and biomass for three commercial pelagic fish species along the East coast of Peninsular Malaysia using a Split-Beam echo sounder. *Journal of Coastal Research*, 2017, 33(6): 1448–1459
- HE L X, FU D Y, LI Z L, *et al.* Spatio-temporal distribution of *Decapterus maruadsi* and its relationship with environmental factors in the northwestern South China Sea. *Progress in Fishery Sciences*, 2023, 44(1): 24–34 [何露雪, 付东洋, 李忠炉, 等. 南海西北部蓝圆鲹时空分布及其与环境因子的关系. *渔业科学进展*, 2023, 44(1): 24–34]
- HUA C X, ZHU Q C, SHI Y, *et al.* Comparative analysis of CPUE standardization of Chinese Pacific saury (*Cololabis saira*) fishery based on GLM and GAM. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(10): 100–110
- LEWIN W C, MEHNER T, RITTERBUSCH D, *et al.* The influence of anthropogenic shoreline changes on the littoral abundance of fish species in German lowland lakes varying in depth as determined by boosted regression trees. *Hydrobiologia*, 2014, 724(1): 293–306
- LI Y, JIAO Y, HE Q. Decreasing uncertainty in catch rate analyses using Delta-AdaBoost: An alternative approach in catch and bycatch analyses with high percentage of zeros. *Fisheries Research*, 2011, 107(1/2/3): 261–271
- LIU M Y, LÜ Z H, TIAN S Q, *et al.* Spatial distribution of *Larimichthys polyactis* in Wen-Tai fishing ground based on habitat suitability index. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2020, 29(1): 92–101 [刘梦影, 吕泽华, 田思泉, 等. 应用栖息地适宜性指数研究温台渔场小黄鱼的空间分布特征. *上海海洋大学学报*, 2020, 29(1): 92–101]
- LIU X X, GAO C X, ZHAO J, *et al.* Modeling and comparison of count data containing zero values: A case study of *Setipinna taty* in the south inshore of Zhejiang, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(34): 46827–46837
- 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. *Fisheries Research*, 2019, 218: 209–217
- LONG X Y, WAN R, LI Z G, *et al.* Spatio-temporal distribution of *Konosirus punctatus* spawning and nursing ground in the South Yellow Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 40(8): 133–144
- MA J, HUANG J L, CHEN J H, *et al.* Analysis of spatiotemporal fish density distribution and its influential factors. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(6): 936–946 [马金, 黄金玲, 陈锦辉, 等. 基于 GAM 的长江口鱼类资源时空分布及影响因素. *水产学报*, 2020, 44(6): 936–946]
- MA J, LI B, ZHAO J, *et al.* Environmental influences on the spatio-temporal distribution of *Coilia nasus* in the Yangtze River estuary. *Journal of Applied Ichthyology*, 2020, 36(3): 315–325
- MA W, QIN S, ZHAO J. Distribution characteristics and influencing factors of fish resources in the offshore waters south of Zhejiang. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(3): 1–11 [马稳, 秦松, 赵静. 浙江南部近海鱼类资源季节分布特征及其影响因素. *渔业科学进展*, 2022, 43(3): 1–11]

- MAUNDER M N, PUNT A E. Standardizing catch and effort data: A review of recent approaches. *Fisheries Research*, 2004, 70(2/3): 141–159
- PERUMEAN-CHANEY S E, MORGAN C, MCDOWALL D, *et al.* Zero-inflated and overdispersed: What's one to do? *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 2013, 83(9): 1671–1683
- PLANQUE B, BELLIER E, LAZURE P. Modelling potential spawning habitat of sardine (*Sardina pilchardus*) and anchovy (*Engraulis encrasicolus*) in the Bay of Biscay. *Fisheries Oceanography*, 2007, 16(1): 16–30
- QIU Y S. Ordinations of fish communities in the inshore waters of Guangdong Province. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(6): 576–583 [邱永松. 广东沿岸海域鱼类群落排序. *生态学报*, 1996, 16(6): 576–583]
- SHONO H. Application of the Tweedie distribution to zero-catch data in CPUE analysis. *Fisheries Research*, 2008, 93(1/2): 154–162
- SUN W W. Application of generalized additive model to automobile insurance ratemaking based on Tweedie distributions. *Journal of Tianjin University of Commerce*, 2014, 34(1): 60–67 [孙维伟. 基于 Tweedie 类分布的广义可加模型在车险费率厘定中的应用. *天津商业大学学报*, 2014, 34(1): 60–67]
- TANAKA K R, CHANG J H, XUE Y, *et al.* Mesoscale climatic impacts on the distribution of *Homarus americanus* in the US inshore Gulf of Maine. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2019, 76(4): 608–625
- TWEEDIE M C K. An index which distinguishes between some important exponential families. *Proceedings of the Indian Statistical Institute Golden Jubilee International Conference*. Calcutta, India: Indian Statistical Institute, 1984, 579–604
- WANG L X. Preliminary study on fish communities during spring and autumn in water of Beibu Gulf. Master's Thesis of Ocean University of China, 2009 [王理想. 北部湾海域春、秋季鱼类群落结构初步研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2009]
- WANG Y H, JIANG G C, DONG H L. Distribution characteristics and relationship of dissolved oxygen, pH value and nutrients in the southern sea of Zhejiang in spring. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, 12(5): 654–660 [王玉衡, 蒋国昌, 董恒霖. 春季浙江南部海区溶解氧、pH 值和营养盐分布特征及相互关系研究. *海洋学报*, 1990, 12(5): 654–660]
- WOOD S N, PYA N, SÄFKEN B. Smoothing parameter and model selection for general smooth models. *Journal of the American Statistical Association*, 2016, 111: 1548–1563
- YU H, COOPER A R, INFANTE D M. Improving species distribution model predictive accuracy using species abundance: Application with boosted regression trees. *Ecological Modelling*, 2020, 432: 109202
- YU N J, YU C G, XU Y J, *et al.* The relationship between distribution of fish abundance and environmental factors in the outer waters of the Zhoushan Islands. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 42(10): 80–91 [于南京, 俞存根, 许永久, 等. 舟山群岛外海域鱼类数量分布与环境因子的关系. *海洋学报*, 2020, 42(10): 80–91]
- ZHANG Q H, CHENG J H, XU H X, *et al.* Fishery resources and their sustainable utilization in the East China Sea. Shanghai: Fudan University Press, 2007 [张秋华, 程家骅, 徐汉祥, 等. 东海渔业资源及其可持续利用. 上海: 复旦大学出版社, 2007]
- ZHANG T J, SONG L M, YUAN H C, *et al.* A comparative study on habitat models for adult bigeye tuna in the Indian Ocean based on gridded tuna longline fishery data. *Fisheries Oceanography*, 2021, 30(5): 584–607
- 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. *Acta Oceanologica Sinica*, 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. *海洋学报*, 2019, 41(12): 78–89]
- ZHAO H, FENG Y, DONG C, *et al.* Spatiotemporal distribution of *Decapterus maruadsi* in spring and autumn in response to environmental variation in the northern South China Sea. *Regional Studies in Marine Science*, 2021, 45: 101811
- ZHAO J, ZHANG S Y, WANG Z H, *et al.* Fish community diversity distribution and its affecting factors based on GAM model. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(12): 3226–3235 [赵静, 章守宇, 汪振华, 等. 基于 GAM 模型的鱼类群落多样性分布及影响因素. *生态学杂志*, 2013, 32(12): 3226–3235]
- ZHENG Y J, LI J S, ZHANG Q Y, *et al.* Research progresses of resource biology of important marine pelagic food fishes in China. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38(1): 149–160 [郑元甲, 李建生, 张其永, 等. 中国重要海洋中上层经济鱼类生物学研究进展. *水产学报*, 2014, 38(1): 149–160]
- ZHU D L, SONG H T, BO Z L, *et al.* A study on mackerel and round scad fishing ground off Zhejiang coast in the Summer-Autumn season. *Marine Science Bulletin*, 1984, 3(2): 62–70 [朱德林, 宋海棠, 薄冶礼, 等. 浙江近海夏秋季鲐鲹渔场的研究. *海洋通报*, 1984, 3(2): 62–70]

Distribution of Japanese Scad (*Decapterus maruadsi*) and Its Relationship with Environmental Factors in the Coast Waters of Southern Zhejiang Based on the Tweedie-GAM

MA Wen¹, QIN Song², GAO Chunxia^{1,3}, TANG Wei¹, MA Jin^{1,3}, ZHAO Jing⁴①

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

2. Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325005, China;

3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;

4. Institute of Marine Science of Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract This study used Tweedie-GAM to evaluate the distribution characteristics of Japanese scad (*Decapterus maruadsi*) in spring, summer, and autumn (from 2015 to 2020) and its relationship with marine environmental factors. The fishery resources data from the southern Zhejiang coastal waters were combined with the hydrological environment survey data collected simultaneously. The results showed significant differences in the Japanese scad spatial distribution in different seasons. Japanese scad is mainly concentrated in the nearshore waters in spring and concentrated primarily on the south and north regions of the Zhejiang southern waters in summer, showing a "high on both sides, low in the middle" pattern. The distribution pattern in autumn is opposite to that in spring, wherein the Japanese scad mainly concentrated in open waters. There are some differences in the key influencing factors of Japanese scad in different seasons. In spring, with a range of 19.5~25.0 °C, the resource density firstly showed an increasing trend and then decreased with the rise in water temperature, peaking at 22.7 °C. During summer, the water temperature reached 28.0~30.3 °C, and the resource density showed the maximum value when the salinity was 32.3. In autumn, the resource density showed a decreasing trend and later increased with the increment in the water salinity, with a minimum value of 29.8. The relationship between resource density and water depth remained stable, showing a multi-wavy nonlinear relationship, with an overall increasing trend and later stable pattern. This study revealed the relationship between the Japanese scad's temporal and spatial distribution characteristics and environmental factors. It provides a research reference for the conservation, management, and sustainable utilization of Japanese scad in the coastal waters of southern Zhejiang.

Key words *Decapterus maruadsi*; Tweedie-GAM; Resource distribution; Environmental factors; Coast waters of southern Zhejiang

① Corresponding author: ZHAO Jing, E-mail: jzhao@shou.edu.cn