

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20210610001

http://www.yykxjz.cn/

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): 01–11

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): 01–11

# 浙江南部近海鱼类资源季节分布特征及其影响因素\*

马 稳<sup>1</sup> 秦 松<sup>2</sup> 赵 静<sup>1,3,4</sup>①

(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. 国家远洋渔业工程技术研究中心 上海 201306;

4. 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)

**摘要** 根据 2016—2020 年浙江南部鱼类资源调查数据, 运用广义加性模型研究浙江南部各季节鱼类资源与环境因子的关系, 并基于 2020 年环境数据探究鱼类资源时空分布特征。结果显示, 春季、夏季、秋季和冬季最佳模型的偏差解释率分别为 47.9%、68.0%、56.6% 和 45.6%, 交叉验证回归线的斜率平均值为 0.74~1.02, 模型拟合能力和预测能力良好。水温、盐度和叶绿素是影响浙江南部海域鱼类资源密度的主要因子, 在不同季节对鱼类资源密度有不同的影响机制。水温在夏季和秋季对鱼类资源密度影响极显著( $P<0.01$ ), 秋季, 水温和资源密度之间存在显著负相关( $r=-0.225$ ,  $P<0.05$ ); 盐度在不同季节对鱼类资源密度的影响也存在差异, 秋季, 鱼类资源密度随着盐度的增加而增加, 冬季则呈先增加后减小的变化趋势, 且在盐度为 31.5 时达到最大值; 除冬季外, 其他季节叶绿素浓度与鱼类资源密度均显著相关( $P<0.05$ )。研究表明, 2020 年春季、夏季鱼类资源密度相对较高, 秋季和冬季鱼类资源密度则相对偏低。空间上, 春季, 温台渔场的鱼类资源密度明显高于鱼山渔场; 夏季, 温台渔场和鱼山渔场鱼类资源均较为集中, 主要分布在 27.8°~28.4°N、121.7°~122.9°E 以及 28.9°N、122°E 海域附近。

**关键词** 广义加性模型; 鱼类资源; 资源分布; 环境因子; 浙江南部近海  
**中图分类号** S931 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2022)03-0001-11

浙江南部近海位于我国东海海域, 在闽浙沿岸水和台湾暖流等多种水团的影响下, 营养盐及饵料生物较为充足(张秋华等, 2007; 王玉衡等, 1990), 使得该海域鱼类资源较为丰富。同时, 该海域也是拖网、流刺网以及灯光围网作业的良好渔场。近年来, 受水域污染、过度捕捞等影响, 浙江南部近海鱼类资源衰退明显(杜晓雪等, 2018; 俞存根等, 2009), 国家和地方政府制定了禁渔期和自然保护区等保护措施以保障鱼类等渔业资源的可持续利用, 围绕渔业资源学及其

科学管理的研究也逐步深入。在水域生态系统中, 鱼类群落组成和空间分布对生态系统物质循环和能量流动起到重要作用(郭朋军等, 2020; 从婷婷等, 2021; 刘燕山等, 2021), 鱼类是评价水域生态系统完整与健康的重要指标, 但该海域鱼类资源的时空分布特征及其与环境因子之间的关系尚不明确, 有待进一步探究, 进而可为该海域鱼类资源的保护和持续利用提供支撑。

模型手段是建立与探析渔业资源生物资源量与

\* 国家自然科学基金项目(41906074; 31902372)和浙江省渔业资源专项调查项目(158053)共同资助 [This work was supported by National Natural Science Foundation of China (41906074; 31902372), and the Fisheries Resource Survey of Zhejiang Province, China (158053)]. 马 稳, E-mail: ma1997wen@163.com

① 通讯作者: 赵 静, E-mail: jzhao@shou.edu.cn

收稿日期: 2021-06-10, 收修改稿日期: 2021-07-07

环境因子之间关系的有效方式(牛明香等, 2020), 其中, 广义加性模型(generalized additive model, GAM)因限制条件少、运用灵活, 被广泛应用于渔业资源与环境因子的关系研究(Piet, 2002)。该模型在实际应用过程中, 函数表达式不固定, 能够对影响鱼类数量的环境因子进行整体或单独的探究, 是一种探索预测变量与自变量之间复杂关系的有效工具。GAM 相比传统模型, 具有精度高、运用灵活等优点(王圆圆等, 2017), 已在产卵场与鱼类群落多样性预测(吴建辉等, 2019; 万荣等, 2020)、渔业资源分布与环境因子关系(陈新军等, 2007; 郑波等, 2008; Li *et al.*, 2015; 马金等, 2020)等方面得到应用。研究者使用 GAM 在浙江南部近海开展了龙头鱼(*Harpodon nehereus*) (杜晓雪, 2018)和小黄鱼(*Larimichthys polyactis*) (戴黎斌等, 2018)分布规律及影响因素的研究, 发现龙头鱼的分布与底层水温和 pH 密切相关, 而小黄鱼分布的影响因子在不同季节间存在较大差异。但以整体鱼类群落为对象研究鱼类资源分布规律与环境因子之间的关系仍待进一步探究。

渔业资源时空分布和环境因子的关系一直是渔业生态学研究关注的焦点, 如水温对鱼类的洄游分布和生长发育具有重要影响(陈新军, 2014), 盐度在鱼类的生长、繁殖发育和其他生理过程有着较为重要的作用(王云峰等, 2002)。诸多研究也揭示了鱼类的分布规律和特点, 从而为资源量预测、栖息地研究、渔场寻找提供了必要的参考依据和理论支撑。因此, 准确掌握鱼类资源时空分布规律, 对了解种群动态、渔业资源评估与管理策略评价具有重要意义。基于 2016—2020 年渔业资源独立调查数据, 本研究使用 GAM 探究了浙江南部近海鱼类资源与环境因子的关系, 了解其分布规律以及最新动态, 以期为浙江南部近海鱼类资源的养护管理与可持续利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

数据来源于 2016—2020 年在浙江南部近海调查(图 1), 主要包括水文环境和渔业数据, 调查时间为每年的 2 月(冬季)、5 月(春季)、8 月(夏季)和 11 月(秋季)。调查船为“浙洞渔 10109 号”, 总吨位 800 t, 底拖网(全长约 95 m, 网口宽 40 m, 高 7.5 m), 底纲和浮子纲长度为 80 m, 网囊网目为 2 cm, 拖速为 2~4 kn, 每个调查站点作业时间为 1 h 左右。样品的采集、测定和分析根据国家《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 17378.3-1998)进行。

由于受到恶劣天气、新冠肺炎疫情等不可抗力因素影响, 部分航次及有关调查内容未能开展, 由此缺少的水文环境数据通过相关网站获取。2017 年 2 月、5 月和 11 月以及 2018 年 5 月和 8 月的 pH 值数据来自于哥白尼海事局网站(<https://marine.copernicus.eu>), 该数据为月平均数据, 空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。调查站位的叶绿素数据来源于美国国家海洋和大气管理局官方网站(<https://www.noaa.gov>), 该数据为月平均数据, 空间分辨率为  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。受新冠疫情影响, 2020 年 2 月(冬季)未能出海调查, 该季节环境数据均来自于上述网站。由于相关网站的环境数据与鱼类资源数据尺度不一致, 因此, 通过克里金插值法将获取的水文环境数据分辨率统一转化为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

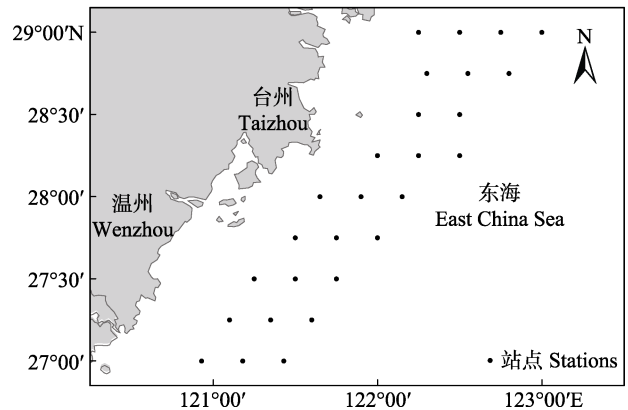


图 1 浙江南部近海鱼类资源采样站点分布  
Fig.1 Distribution of sampling stations in offshore waters south of Zhejiang

### 1.2 研究方法

**1.2.1 数据分析** 单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE)可以较好地反映渔业资源量或资源密度的相对大小, 因此, 本研究选用 CPUE 作为渔业资源丰度的相对指标(Maunders *et al.*, 2004)。CPUE 定义为某站点单位时间内获得鱼类渔获总量, 具体表达式为:

$$CPUE_k = \frac{W_k}{T_k} \quad (1)$$

式中,  $CPUE_k$  为第  $k$  个站点的鱼类资源密度指数(g/h);  $W_k$  为第  $k$  个站点的鱼类渔获总量(g);  $T_k$  为第  $k$  个站点的作业时间(h)。

**1.2.2 模型的建立** GAM 能拟合响应变量和解释变量之间的非线性关系, 其表达式为:

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

式中,  $\alpha$  为拟合模型中的截距,  $f_j$  为平滑函数(样条平滑或 loess 平滑),  $X_j$  为自变量, 残差  $\varepsilon = \sigma^2$  且  $E(\varepsilon) = 0$ 。

参考东海中南部鱼类在空间结构上可分为不同的生物群落类型的研究结果(李圣法等, 2005), 选用经度和纬度作为鱼类资源空间分布的影响因子。鉴于鱼类以及其他水生生物对水温和盐度的适应性不同(李圣法等, 2007), 从而影响鱼类的分布和生物量, 同时, 叶绿素和 pH 在各季节驱动了鱼类群落的时空变异(张迎秋, 2012), 因此, 选择水温、盐度、叶绿素和 pH 作为影响鱼类分布的环境影响因子。因变量(鱼类资源密度)经自然对数变换后, 建立其与解释变量(各环境因子)之间的模型关系, 且误差假定为高斯分布, 同时, 本研究未考虑解释变量之间的交互作用。因变量与解释变量的 GAM 具体表达式为:

$$\ln(\text{CPUE}) = s(\text{Lat}) + s(\text{Lon}) + s(T) + s(\text{Chl-}a) + s(S) + s(\text{pH}) + \varepsilon, \text{family} = \text{gaussian} \quad (3)$$

式中,  $s$  为自然样条平滑, Lat 为纬度, Lon 为经度,  $T$  为水温, Chl- $a$  为叶绿素,  $S$  为盐度, pH 为水体的酸碱度,  $\varepsilon$  为相对误差, family 为分布模式并选择高斯分布。

**1.2.3 最佳拟合模型的选择及其预测能力检验** 通过方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)判断预测变量间是否存在共线性。当  $\text{VIF} > 3$  时, 认为该预测变量与其余预测变量存在共线性(Sagarese *et al.*, 2014); 当只有 1 个预测变量的  $\text{VIF} > 3$  时, 移除该预测变量, 对其余的预测变量进行共线性检验; 当  $\text{VIF}$  均  $< 3$ , 则认为预测变量间不存在共线性; 当多个预测变量的  $\text{VIF} > 3$  时, 选取其中一个预测变量与  $\text{VIF} < 3$  的预测变量再次进行共线性检验, 如  $\text{VIF}$  均  $< 3$ , 则认为预测变量间不存在共线性。对经过筛选的变量因子进行排列组合, 分别建立与 CPUE 之间的 GAM。

赤池信息准则(akaike information criterion, AIC)可以用来衡量多组模型的拟合优度(Benjamin *et al.*, 2007), AIC 值越小, 模型的拟合程度越好。本研究依照赤池信息准则, 对各季节建立的 GAM 进行逐一检验, 选取不同季节下 AIC 值最小的模型为该季节的最佳拟合模型。此外, 本研究通过  $F$  检验评估预测变量对解释变量的影响显著程度。

利用 2016—2019 年的数据建立 GAM, 并对每个季节最优模型的预测能力进行交叉验证。参照 Diego 等(2010)的方法进行 5 折交叉验证, 并重复 100 次,

通过构建模型预测值和实际观测值之间的线性关系来描述二者之间的关系, 表达式如下:

$$\ln Y = a + b \times \ln y \quad (4)$$

式中,  $y$  为模型的预测值,  $Y$  为模型的实际观测值,  $a$ 、 $b$  反映预测值和实际观测值之间的偏差, 当  $a=0$ 、 $b=1$  时, 意味着预测的资源密度和实际观察到的资源密度(即测试数据)具有相似的空间模式, 并且该模型具有良好的预测性能(Li *et al.*, 2015)。

### 1.3 鱼类资源密度的分布预测

利用 2020 年浙江南部近海 4 个季节每个站点环境调查数据, 将调查区域按照  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  大小的栅格进行划分, 通过计算获得每个栅格中心点的坐标, 并使用克里金插值法提取每个栅格中心点的水文环境数据。以环境数据为解释变量, 使用各季节最佳模型对 2020 年 4 个季度浙江南部近海鱼类资源密度进行预测。

本研究所有统计分析均在 R 语言软件(V3.6.0)中进行, GAM 通过“mgcv”包实现, 鱼类资源分布图在 Arcmap 10.2 软件中进行绘制。

## 2 结果

### 2.1 影响因子共线性检验

本研究选取的 6 个影响因子中, 4 个季节经度和纬度的 VIF 值均  $> 3$ , 水温、盐度等其他 4 个影响因子的 VIF 值均  $< 3$ 。分别移除经度和纬度, 对预测环境因子进行共线性检验后 VIF 均  $< 3$ (表 1)。

表 1 预测变量共线性检验结果  
Tab.1 Collinearity test for predictor variables

季节 Season	方差膨胀因子 VIF					
	经度 Lon	纬度 Lat	水温 $T$	盐度 $S$	叶绿素 Chl- $a$	酸碱度 pH
春季 Spring	9.95	11.09	1.38	1.65	1.78	1.43
	—	1.22	1.38	1.36	1.51	1.42
	1.09	—	1.37	1.31	1.37	1.43
夏季 Summer	7.88	9.35	1.15	1.70	1.12	1.18
	—	1.34	1.15	1.46	1.06	1.18
	1.13	—	1.15	1.23	1.08	1.00
秋天 Autumn	12.84	10.92	1.89	2.24	1.53	1.46
	—	1.29	1.80	1.94	1.34	1.94
	1.52	—	1.82	2.13	1.25	1.46
冬季 Winter	18.38	17.47	3.12	1.04	1.82	1.04
	—	1.02	2.31	1.23	1.23	2.43
	1.07	—	2.29	2.30	1.24	1.04

注: “—” 表示移除该因子

Note: the “—” denotes the removed factor

## 2.2 各季节最佳模型

通过对不存在共线性关系的环境因子进行排列组合,分别建立 GAM。结果如表 2 所示,春季最佳模型的变量组合为 Lon+T+S+Chl-*a*,模型 AIC 值为 171.59,解释率为 47.9%,叶绿素为显著影响因子,且达到极显著水平( $P<0.01$ )。夏季最佳模型的变量组合为 Lat+T+S+Chl-*a*+pH,模型 AIC 值为 182.97,解释率为 68.0%,叶绿素、水温、纬度和 pH 为显著影响因子( $P<0.05$ ),且水温和纬度的影响达到极显著水平( $P<0.01$ )。秋季最佳模型的变量组合为 T+S+Chl-*a*

+Lon,模型 AIC 值为 179.24,解释率为 56.6%,水温、盐度和叶绿素为显著影响因子( $P<0.05$ ),且水温和盐度的影响达到极显著水平( $P<0.01$ )。冬季的最佳模型的变量组合为 Lat+S+T,模型 AIC 值为 132.59,解释率为 45.6%,纬度和盐度为显著影响因子,且达到极显著水平( $P<0.01$ )。此外,通过对比发现,在不同模型中贡献率最大的因子也存在差异,盐度、水温、盐度和纬度分别在春季、夏季、秋季和冬季的模型中的相对贡献率最大,分别为 64.23%、46.87%、44.63%和 53.25%。

表 2 各季节最佳拟合模型参数  
Tab.2 Parameters of the optimal model in each season

季节 Season	最佳模型 Optimal model	P 值 P value	赤池信息准则 AIC	偏差解释 Deviance explained /%	相对贡献率 Relative contribution rate /%
春季 Spring	盐度 S	0.110	171.59	47.9	64.23
	水温 T	0.079			18.32
	叶绿素 Chl- <i>a</i>	0.003			17.00
	经度 Lon	0.270			0.45
夏季 Summer	水温 T	0.001	181.97	68.0	46.87
	叶绿素 Chl- <i>a</i>	0.038			26.94
	酸碱度 pH	0.024			14.08
	纬度 Lat	0.007			9.68
秋季 Autumn	盐度 S	0.320	179.24	56.6	2.43
	盐度 S	$1.43 \times 10^{-5}$			44.63
	水温 T	$3.66 \times 10^{-7}$			41.85
	叶绿素 Chl- <i>a</i>	0.018			8.09
冬季 Winter	经度 Lon	0.222	132.59	45.6	5.43
	纬度 Lat	$4.80 \times 10^{-3}$			53.25
	水温 T	0.076			27.59
	盐度 S	$4.40 \times 10^{-4}$			19.16

## 2.3 鱼类资源密度与环境因子之间的关系

春季,叶绿素与鱼类资源密度呈负相关关系,随着叶绿素浓度增加,鱼类资源密度呈下降的趋势(图 2a)。夏季,鱼类资源密度在调查范围内随纬度呈增加的趋势(图 2b);在水温 26.0℃~30.3℃范围内,鱼类资源密度随水温的增加呈下降趋势,水温高于 30.3℃后,鱼类资源密度随水温的升高而升高(图 2c);pH 在 7.9~8.4 范围内变化时,鱼类资源密度呈先减小后增大的变化趋势,当 pH 为 8.1 时,鱼类资源密度达到最低值(图 2d);叶绿素和 pH 的变化趋势类似,在叶绿素为 2.5 mg/m<sup>3</sup>时,鱼类资源密度达到最低值(图 2e)。秋季,水温在 19℃~24℃时,鱼类资源密度与水温呈线性负相关(图 2f);盐度和鱼类资源密度为

多波峰状非线性关系,但整体上资源密度随盐度的增加而升高(图 2g);鱼类资源密度与叶绿素呈先降后升的趋势(图 2h)。冬季,随纬度升高,鱼类资源密度随之升高(图 2i);在盐度超过 31.5 时,鱼类资源密度呈下降趋势(图 2j)。

## 2.4 模型性能检验

交叉验证结果显示(图 3),春季的交叉验证回归线斜率均值在 4 个季节中最大,为 1.02,其次为秋季,为 0.94,而冬季回归线斜率均值在 4 个季节中最低,仅为 0.74。春季的交叉验证回归线截距均值在 4 个季节中最小,为-0.25,其次为秋季,为 0.57,而冬季回归线截距均值在 4 个季节最高,为 2.45。秋季的模型交叉验证回归线决定系数均值在 4 个季节中最大,

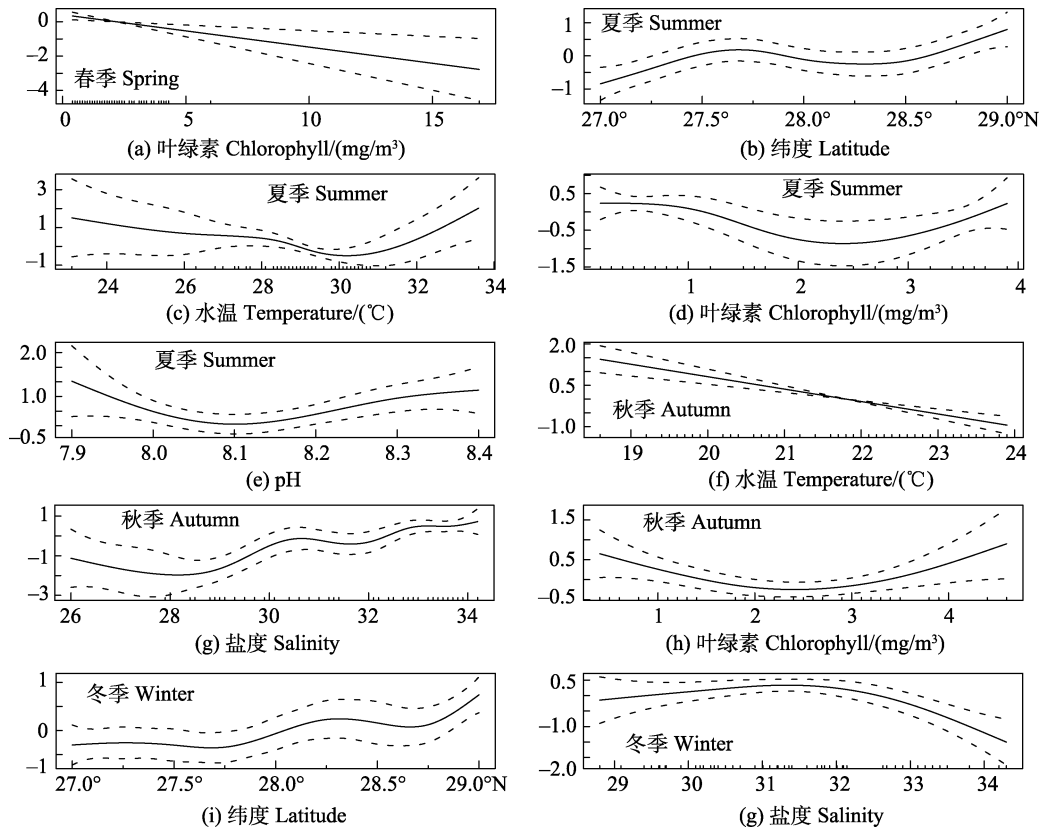


图 2 不同季节最佳 GAM 的显著性环境因子与资源密度关系

Fig.2 Relationship between significant environmental factors and resource density of optimal GAM in different seasons

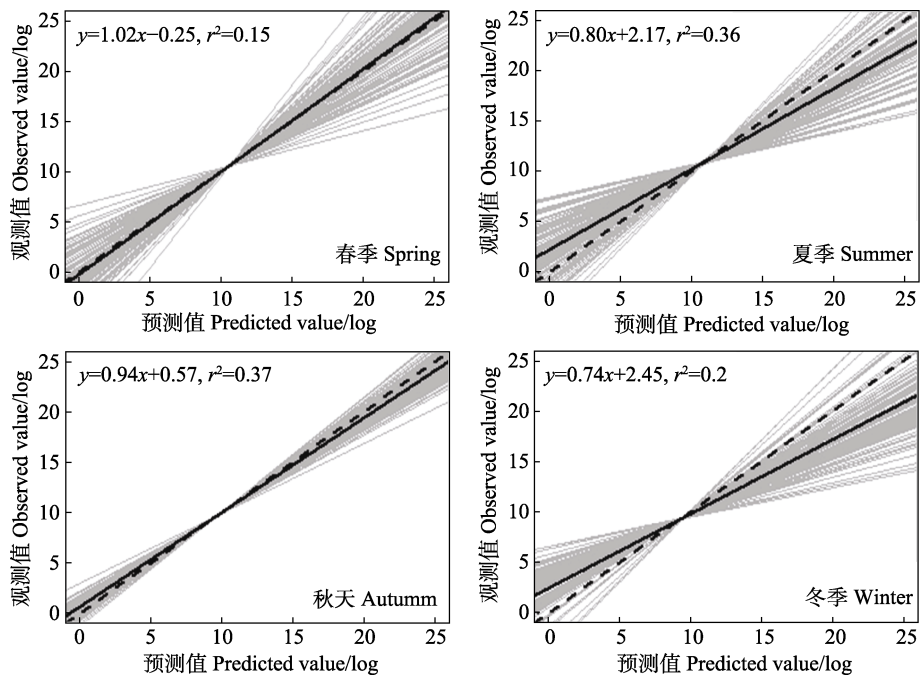


图 3 不同季节 GAM 预测值与实际观测值交叉验证线性回归

Fig.3 Cross validation linear regression of GAM predicted value and observation value in different seasons

灰色实线为每次 5 折交叉验证的回归线, 黑色实线为交叉验证的平均效应, 黑色虚线为 1 : 1 线  
 The gray solid line was the regression line of 100 times of 5 fold cross validation, the black solid line was the average effect of cross validation, and the black dotted line was the 1 : 1 line

为 0.37；其次为夏季，回归决定系平均值为 0.36，相对于其他季节而言，春季回归决定系数平均值最低，仅为 0.15。

## 2.5 浙江南部近海鱼类资源时空分布

在时间尺度上，2020 年，浙江南部近海鱼类资源密度各季节间存在明显的差异，鱼类资源密度在夏

季最高，在秋季和冬季相对偏低(图 4)。空间分布上，除夏季外，鱼类资源密度皆呈现外侧水域大于内侧水域的分布格局，秋季和冬季这一现象尤为明显(图 4)。此外，春季，温台渔场的鱼类资源密度明显高于鱼山渔场；夏季，温台渔场和鱼山渔场鱼类资源均较为集中，主要分布在 27.8°~28.4°N、121.7°~122.9°E 以及 28.9°N、122°E 海域附近(图 4)。

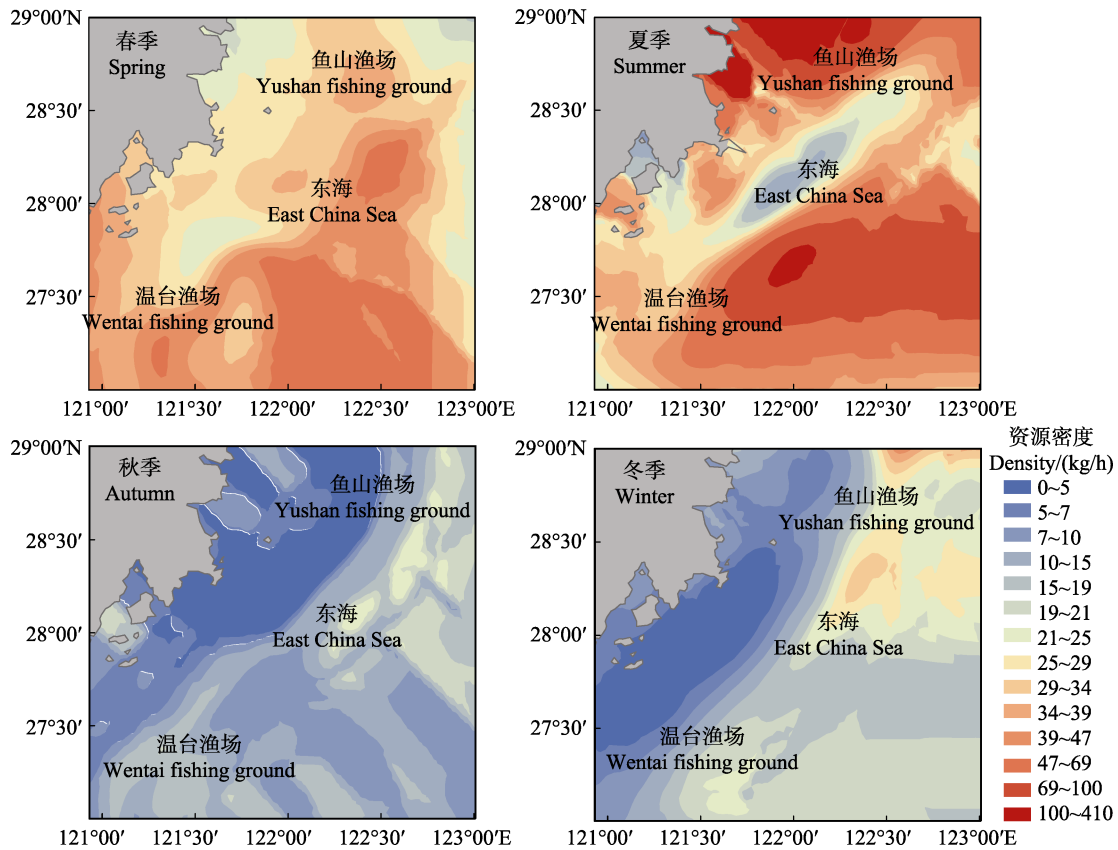


图 4 2020 年不同季节鱼类资源预测空间分布

Fig.4 Predicted spatial distribution of fish resources in different seasons in 2020

## 3 讨论

### 3.1 浙江南部近海环境因子对鱼类资源密度的影响

本研究发现，各季节最佳预测模型因子组合存在较大不同，但水温和盐度在 4 个季节的最佳模型中均出现且具有较高的解释率；叶绿素出现在春季、夏季和秋季 3 个季节的预测模型中，且与鱼类资源密度显著相关。因此，本研究认为，水温、盐度和叶绿素是影响浙江南部近海海域鱼类资源密度以及分布的关键影响因子。

水温对鱼类的生活习性有着重要影响，不仅对鱼类的新陈代谢、生长发育以及繁殖产生影响，同时，对鱼类的洄游分布、集群行为、渔期的早晚和长短以

及中心渔场的位置有着不可忽视的影响(殷名称, 1995)。本研究发现，水温在夏季预测模型中贡献率最大，而在春季和秋季，盐度贡献率最大，这与 Gibson 等(1994)发现水温是控制鱼类生长和资源密度最重要的水文要素存在差异，其原因可能是本研究分季节分别建立模型，减小了季节间水温变化对鱼类资源的影响(马金等, 2020)。夏季，水温与资源密度呈负相关性，这可能是由于夏季水温较高，而浙江南部近海鱼类为暖水种和暖温种鱼类(杜晓雪等, 2018)，过高的水温不利于其栖息(陈新军, 2014)。冬季，越冬期的鱼类已从索饵场和产卵场过渡到东侧水域的越冬场，外侧水域的水温较沿岸高(陈伟峰等, 2017)，因此，冬季水温越高的水域，鱼类资源密度越高，从而表现

出水温与资源密度间存在正相关性, 这与 Hajisamae 等(2010)的研究结果相一致。

盐度对鱼类生活史的各个阶段都有重要的影响(王云峰等, 2002), 盐度在垂直或水平方向上的变化可以反映出鱼类洄游、集群的变化(胡杰, 1995)。本研究中, 秋季该海域外侧站点受到黑潮表层水的影响, 盐度自西向东(张秋华等, 2007), 而外侧水域鱼类资源密度大于内侧(陈伟峰等, 2017), 因此, 呈现出鱼类资源密度随盐度的增加而增加的趋势, 这与 GAM 结果相一致。

叶绿素对于鱼类资源分布有着重要影响。研究表明, 叶绿素 *a* 浓度是反映浮游植物生物量的重要指标(张迎秋, 2012), 可以根据叶绿素 *a* 的含量估算初级生产力(周伟华等, 2004)。一般来讲, 叶绿素浓度越高, 水域初级生产力越高, 更有利于洄游鱼类群体的摄食和育肥。但本研究发现, 春季浙江南部近海叶绿素与鱼类资源密度呈负相关关系, 夏季和秋季鱼类资源密度随叶绿素浓度升高呈先下降后上升的趋势。汪振华等(2011)、赵静等(2013)研究发现, 在浙江舟山马鞍列岛海域, 鱼类资源密度与叶绿素浓度呈负相关关系, 可能是由于同期鱼类资源密度受其他影响因子的作用更大, 导致鱼类资源密度分布与叶绿素浓度大小不相符。

### 3.2 鱼类资源密度时空分布特征

浙江南部近海鱼类资源密度有着明显的季节变化特征。春季的鱼类资源密度相对秋冬季较高, 但相对夏季偏低。于南京等(2020)研究认为, 这与大多数鱼类在春季产卵, 鱼类多为幼鱼, 其体型、体长和体重相对于其他季节相对较小有关。夏季的鱼类资源密度在 4 个季节中最高, 龙华(2005)研究表明, 在一定范围内, 鱼类的生长速度会随着水温的升高而加快, 且 5—9 月为该海域禁渔期, 因此, 鱼类群体在没有捕捞压力、饵料相对充足的条件下(陈新军, 2014), 快速生长, 成鱼数量逐渐增加, 资源密度在夏季达到最大值。秋季的鱼类资源密度相对于夏季明显下降, 这与禁渔期结束后, 捕捞努力量陡然增加, 大量鱼类资源被捕获有密不可分的关系。冬季的鱼类资源密度在 4 个季度中为最小值, 主要原因是冬季近岸水温过低, 较多鱼类向东侧深海水域进行越冬洄游, 造成该海域冬季鱼类资源密度下降(陈伟峰等, 2017)。总体来说, 基于渔业资源独立调查的浙江南部近海鱼类资源的季节变化大致规律为春季鱼类产卵行为使得鱼类资源密度相对偏低, 伏季休渔使得鱼类资源得以休养生息, 使得鱼类资源密度在夏季最高, 休渔期的结

束伴随捕捞力量的陡然出现, 使得鱼类资源密度在秋季明显降低, 冬季鱼类向海的越冬洄游使得浙江南部近海鱼类资源密度进一步降低。鱼类自身生长发育、水文环境变化以及人为捕捞等多种因素的共同作用下, 浙江南部近海鱼类资源呈现上述明显的季节变化。

各季节鱼类资源空间分布特征也存在明显的差异, 这与该海域常年受到黑潮、台湾暖流以及东海沿岸流等多种海流、水团的共同影响(张秋华等, 2007; 俞存根等, 2009)使该海域水文环境彼此间存在较大差异有关, 从而影响了鱼类的分布与洄游。在内侧水域, 黑潮暖流与闽浙沿岸水交汇成混合水, 其水温和盐度季节变化明显, 具有广温和广盐等特点, 且存在较强的变异性(李圣法等, 2005), 这使得该海域鱼类对水温和盐度适应性较强(李圣法, 2005), 分布范围较广, 具有明显的洄游习性。而大陆架外缘海域受到黑潮以及台湾暖流的影响, 常年保持着高温和高盐的特性, 使分布于该海域的鱼类大多数为暖水种鱼类(李圣法, 2005), 与内侧水域鱼类群落存在明显的差异。相关研究表明, 水文环境也可以通过对饵料生物发生、数量变动的的作用(李建生等, 2009; 胡翠林等, 2018), 间接影响鱼群的资源分布, 如鱼类资源密度会随着浮游植物丰度的增大而增大(李敏等, 2017)。因此, 在生物、非生物环境因子的共同影响下, 该海域在空间分布上呈现出明显的差异。

### 3.3 GAM 影响因素分析

本研究在建立 GAM 前, 对资源密度进行对数化处理, 其主要原因包括: (1)将资源密度数据呈正态分布, 便于数据的观测和统计, 使数据更具有代表性; (2)缩小各个站点资源密度之间的差异, 降低极端值的影响, 可以最大可能地减少误差, 更好地利用 GAM 分析鱼类资源密度与影响因子之间的关系。随后建立鱼类资源密度与影响因子的 GAM, 主要步骤包括: 影响因子共线性检验、GAM 筛选、最佳模型预测性能检验和预测。通过 VIF 检验发现, 4 个季节纬度和经度的 VIF 值均>3(表 1), 因此, 经、纬度分别与环境因子建立 GAM。本研究通过对每个季节最佳预测模型进行 5 折交叉验证来判断模型的预测能力, 显示 100 次交叉验证的平均斜率为 0.74~1.02, 与 1:1 的回归正交线存在偏离, 但预测值和观测值存在明显的正相关关系, 因此, GAM 预测的鱼类资源的时间和空间分布仍具有一定的准确性。

本研究建立的 GAM 拟合程度虽然较好, 但仍然存在部分原因限制模型拟合程度的进一步提高, 可能的原因包括: (1)调查的空间尺度较小, 较短的时间序

列限制模型更好的拟合;(2)渔场的形成与环境要素的时空分布格局存在一定的关联(苏奋振, 2002) (例如, 前期温度偏低, 鱼类提前洄游, 即使后期环境因素有所恢复, 捕捞效果也很差, 难以获取准确的渔业资源密度), 时空分布结构较难参数化并应用于 GAM 分析(朱国平等, 2012); (3)渔业生态系统和渔业统计涉及大量的空间问题, 并存在较多的非线性、非加性的过程(Ciannelli *et al.*, 2008), 对基于模型方法解析鱼类时空分布与环境因子的关系产生一定的影响;(4)由于鱼类的聚集和分布是由环境和生物因素的复杂交互作用决定的(Zhao *et al.*, 2014), 且不同鱼种对环境因子的响应机制存在差异。本研究以整个鱼类群落为研究对象, 虽可以从整体上看环境对鱼类群聚的影响, 但由于不同鱼类受环境因素影响不同, 当研究对象为总体时, 可能会造成单种鱼种结果的相互抵消。本研究发现, 春季主要鱼类种类为黄鲫(*Setipinna taty*)、日本鳀(*Engraulis japonicus*)、蓝圆鲹(*Decapterus maruadsi*)和日本竹荚鱼(*Trachurus japonicus*)等, 夏季主要种类与春季较为接近, 为黄鲫和蓝圆鲹等鱼种。秋季主要鱼类为黄鲫、刀鲚(*Coilia nasus*)和日本鲭(*Scomber japonicas*)等, 冬季为黄鲫、斑鲹(*Konosirus punctatus*)和七星底灯鱼(*Benthoosema pterotum*)等种类。从种类组成上看, 4 个季度主要鱼类均为小型鱼类, 下一步研究中, 将聚焦以群落为研究对象和以种群为研究对象对探究鱼类与环境之间关系的影响。同时, 后续研究可将多物种的空间模型应用进来, 并考虑摄食关系等生物因子, 进一步揭示各因子与鱼类资源密度的关系, 以期更加准确地掌握鱼类资源的时空分布规律。

## 参 考 文 献

- BENJAMIN P, EDWIGE B, PASCAL L, *et al.* Modelling potential spawning habitat of sardine (*Sardina pilchardus*) and anchovy (*Engraulis encrasicolus*) in the Bay of Biscay. *Fisheries Oceanography*, 2007, 16(1): 16–30
- 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]
- CHEN X J. *Fishery resources and fisheries*. 2nd ed. Beijing: Ocean Press, 2014, 152–167 [陈新军. *渔业资源与渔场学*. 第二版. 北京: 海洋出版社, 2014, 152–167]
- CHEN X J, TIAN S Q. Effects of SST and temp-spatial factors on abundance of nylon flying squid *Ommasterphes bartrami* in the northwestern Pacific using generalized additive models. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2007(2): 104–113 [陈新军, 田思泉. 利用 GAM 模型分析表温和时空因子对西北太平洋海域柔鱼资源状况的影响. *海洋湖沼通报*, 2007 (2): 104–113]
- CIANNELLI L, FAUCHALD P, CHAN K S, *et al.* Spatial fisheries ecology: Recent progress and future prospects. *Journal of Marine Systems*, 2007, 71(3): 223–236
- CONG T T, TONG C F, ZHAO C J, *et al.* Community composition and distribution characteristics of the fish assemblages in the rivers of Chongming Island in summer. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(5): 2067–2076 [从婷婷, 童春富, 赵成建, 等. 崇明岛内河夏季鱼类群落组成及分布特征. *生态学报*, 2021, 41(5): 2067–2076]
- DAI L B, TIAN S Q, PENG X, *et al.* Distribution of *Larimichthys polyactis* and its relationship with environmental factors in offshore water of southern Zhejiang. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(4): 1352–1358 [戴黎斌, 田思泉, 彭欣, 等. 浙江南部近海小黄鱼资源分布及其与环境因子的关系. *应用生态学报*, 2018, 29(4): 1352–1358]
- DIEGO R J, ARITZ P, ANTONIO L J. Sensitivity analysis of kappa-fold cross-validation in prediction error estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(3): 569–575
- DU X X, TIAN S Q, WANG J Q, *et al.* Spatial and temporal variations in fish community off shore southern Zhejiang Province, East China Sea. *Journal of Dalian Ocean University*, 2018, 33(4): 522–531 [杜晓雪, 田思泉, 王家启, 等. 浙江南部近海鱼类群落结构的时空特征. *大连海洋大学学报*, 2018, 33(4): 522–531]
- DU X X. Biological characteristics and spatial distribution patten of *Harpadon nehereus* in offshore water of southern Zhejiang. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2018 [杜晓雪. 浙江南部近海龙头鱼的生物学特征及其空间分布格局. 上海: 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2018]
- GIBSON R N. Impact of habitat quality and quantity on the recruitment of juvenile flatfishes. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1994, 32(2): 191–206
- GUO P J, JIANG X Q, YU C G, *et al.* Analysis of the fish community structure in the spring and autumn of the Zhoushan coastal fishing grounds. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(4): 1–11 [郭朋军, 江新琴, 俞存根, 等. 舟山沿岸渔场春秋季节鱼类群落结构特征分析. *渔业科学进展*, 2020, 41(4): 1–11]
- HAJISAMAE S, YEESIN P. Patterns in community structure of trawl catches along coastal area of the South China Sea. *Raffles Bulletin of Zoology*, 2010, 58(2): 357–368
- HU C L, ZHANG Y Z, LI D W, *et al.* Study on fish resources and community diversity during spring and summer in the coastal spawning ground of Zhejiang Province, China. *Acta*



- Hydrobiologica Sinica, 2018, 42(5): 984–995 [胡翠林, 张亚洲, 李德伟, 等. 浙江沿岸产卵场春、夏季鱼类资源密度和群落多样性研究. 水生生物学报, 2018, 42(5): 984–995]
- HU J. Fisheries. Beijing: China Agriculture Press, 1995 [胡杰. 渔场学. 北京: 中国农业出版社, 1995]
- LI B, CAO J, CHANG J H, *et al.* Evaluation of effectiveness of fixed-station sampling for monitoring American lobster settlement. North American Journal of Fisheries Management, 2015, 35(5): 942–957
- LI M, XU B D, MA Q Y, *et al.* Generalized additive model reveals effects of spatiotemporal and environmental factors on the relative abundance distribution of *Konosirus punctatus* in the Yellow River estuary and its adjacent waters. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(5): 963–969 [李敏, 徐宾铎, 麻秋云, 等. 时空及环境因子对黄河口及邻近水域斑鲆资源丰度的影响. 中国水产科学, 2017, 24(5): 963–969]
- LI S F, CHENG J H, YAN L P. The spatial pattern of the fish assemblage structure in the mid-southern East China Sea. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(3): 110–118 [李圣法, 程家骅, 严利平. 东海中南部鱼类群聚结构的时空特征. 海洋学报, 2005, 27(3): 110–118]
- LI S F. Ecology of fish community in the East China Sea continental shelf-spatial pattern and its diversity. Doctoral Dissertation of East China Normal University, 2005 [李圣法. 东海大陆架鱼类群落生态学研究——空间格局及其多样性. 华东师范大学博士研究生学位论文, 2005]
- LI S F, CHENG J H, YAN L P. Spatial structures of fish communities on the continental shelf of the East China Sea. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4377–4386 [李圣法, 程家骅, 严利平. 东海大陆架鱼类群落的空间结构. 生态学报, 2007, 27(11): 4377–4386]
- LI J S, LIN L S, CHENG J H. Distribution characteristic of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis* Bleeker) and its relationship with bottom water temperature and salinity in the northern East China Sea in autumn. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(3): 348–356 [李建生, 林龙山, 程家骅. 东海北部秋季小黄鱼分布特征及其与底层温度和盐度的关系. 中国水产科学, 2009, 16(3): 348–356]
- LIU Y S, GU X K, TANG S K, *et al.* Fish community structure and its relationship with main environmental variables in the East Taihu Lake. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 769–780 [刘燕山, 谷先坤, 唐晟凯, 等. 东太湖鱼类群落结构特征及其与环境因子的关系. 生态学报, 2021, 41(2): 769–780]
- LONG H. The effect of temperature on fish survival. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (Natural Science), 2005, 51(S1): 254–257 [龙华. 温度对鱼类生存的影响. 中山大学学报(自然科学版), 2005, 51(S1): 254–257]
- 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]
- MAUNDER M N, PUNT A E. Standardizing catch and effort data: A review of recent approaches. Fisheries Research, 2004, 70(2/3): 141–159
- NIU M X, WANG J, WU Q, *et al.* The relationship of stock density distribution of wintering anchovy (*Engraulis japonicus*) and environmental factors based on remote sensing in central and southern Yellow Sea. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(1): 11–20 [牛明香, 王俊, 吴强, 等. 基于遥感的黄海中部越冬鳀资源密度分布与环境因子的关系研究. 渔业科学进展, 2020, 41(1): 11–20]
- PIET G J. Using external information and GAMs to improve catch-at-age indices for North Sea plaice and sole. ICES Journal of Marine Science, 2002, 59(3): 624–632
- SAGARESE S R, FRISK M G, CERRATO R M, *et al.* Application of generalized additive models to examine ontogenetic and seasonal distributions of spiny dogfish (*Squalus acanthias*) in the Northeast (US) shelf large marine ecosystem. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2014, 71(6): 847–877
- SU F Z. Spatio-temporal analysis for marine fishery resources. Doctoral Dissertation of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2001 [苏奋振. 海洋渔业资源时空动态研究. 中国科学院地理与资源研究所博士研究生学位论文, 2001]
- WAN R, ZHANG T Z, LI Z G, *et al.* Spatial distribution and inter-annual variability of spawning grounds of *Cynoglossus joyneri* in the Yellow Sea coastal waters in summer. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(3): 1023–1032 [万荣, 张同征, 李增光, 等. 黄海近岸海域短吻红舌鳎夏季产卵场的空间分布及其年际变化. 应用生态学报, 2020, 31(3): 1023–1032]
- WANG Y F, ZHU X H. A review on impact of salinity on patterns of fish ecophysiology. Studia Marina Sinica, 2002, 44(5): 151–158 [王云峰, 朱鑫华. 盐度对鱼类生态生理学特征的影响. 海洋科学集刊, 2002, 44(5): 151–158]
- WANG Y Y, GUO Z, LI G C, *et al.* Precipitation estimation and analysis of the Three Gorges Dam region (1979–2014) by combining gauge measurements and MSWEP with generalized additive model. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(7): 1207–1220 [王圆圆, 郭微, 李贵才, 等. 基于广义加性模型估算 1979–2014 年三峡库区降水及其特征分析. 地理学报, 2017, 72(7): 1207–1220]
- 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]
- WANG Z H, WANG K, ZHAO J, *et al.* Fish community structure and its seasonal change in subtidal sandy beach habitat off southern Gouqi Island. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(5): 1332–1342 [汪振华, 王凯, 赵静, 等. 枸杞岛潮下带沙地生境鱼类群落结构和季节变化. *应用生态学报*, 2011, 22(5): 1332–1342]
- WU J H, DAI L B, DAI X J, *et al.* Comparison of generalized additive model and boosted regression tree in predicting fish community diversity in the Yangtze River estuary, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 644–652 [吴建辉, 戴黎斌, 戴小杰, 等. GAM 模型和 BRT 模型在长江口鱼类群落多样性预测中的比较. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 644–652]
- YIN M C. *Fish ecology*. Beijing: China Agriculture Press, 1995 [殷名称. *鱼类生态学*. 北京: 中国农业出版社, 1995]
- YU C G, YU C D, ZHANG F J, *et al.* Fish species and quantity off southern Zhejiang, East China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(3): 353–360 [俞存根, 虞聪达, 章飞军, 等. 浙江南部外海鱼类种类组成和数量分布. *海洋与湖沼*, 2009, 40(3): 353–360]
- 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 Y Q. Environmental impact on the fish assemblage structure in adjacent sea area of the Yangtze River estuary. Master's Thesis of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2012 [张迎秋. 长江口近海鱼类群落环境影响分析. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所)硕士研究生学位论文, 2012]
- ZHAO J, CAO J, TIAN S Q, *et al.* A comparison between two GAM models in quantifying relationships of environmental variables with fish richness and diversity indices. *Aquatic Ecology*, 2014, 48(3): 297–312
- 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 B, CHEN X J, LI G. Relationship between the resource and fishing ground of mackerel and environmental factors based on GAM and GLM models in the East China Sea and Yellow Sea. *Journal of Fisheries of China*, 2008, 32(3): 379–386 [郑波, 陈新军, 李纲. GLM 和 GAM 模型研究东黄海鲈资源渔场与环境因子的关系. *水产学报*, 2008, 32(3): 379–386]
- ZHOU W H, YUAN X C, HUO W Y, *et al.* Distribution of chlorophyll *a* and primary productivity in the adjacent sea area of Changjiang River estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(3): 143–150 [周伟华, 袁翔城, 霍文毅, 等. 长江口邻域叶绿素 *a* 和初级生产力分布. *海洋学报*, 2004, 26(3): 143–150]
- ZHU G P, ZHU X Y, XU Y Y, *et al.* The spatiotemporal distribution of fishing grounds for antarctic krill (*Euphausia superba*) around the South Orkney Islands in Austral summer-autumn and its relation to environmental factors based on a generalized additive model. *Chinese Journal of Polar Research*, 2012, 24(3): 266–273 [朱国平, 朱小艳, 徐怡瑛, 等. 基于 GAM 模型分析夏秋季南奥克尼群岛南极磷虾渔场时空分布及与环境因子之间的关系. *极地研究*, 2012, 24(3): 266–273]

(编辑 冯小花)

## Distribution Characteristics and Influencing Factors of Fish Resources in the Offshore Waters South of Zhejiang

MA Wen<sup>1</sup>, QIN Song<sup>2</sup>, ZHAO Jing<sup>1,3,4</sup>①

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

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

3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China;

4. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China)

**Abstract** Based on fishery-independent survey data from 2016 to 2020 in the offshore waters south of Zhejiang, the relationship between fish resource density and environmental factors was explored using a generalized additive model, and the spatial and temporal distribution of fish resource density was predicted using the optimal models and environmental data of 2020. The results showed that the optimal models had deviances of 47.9%, 68.0%, 56.6% and 45.6% in spring, summer, autumn, and winter, respectively. The average slope of the cross-validation regression line was 0.74–1.02, and the model had good fitting and prediction abilities. Water temperature, salinity, and chlorophyll were significant factors that affected fish resource density in the offshore waters south of Zhejiang, and they had different influencing mechanisms in different seasons. In general, in summer and autumn, water temperature had a significant impact on fish resource density ( $P < 0.01$ ). And there is a negative correlation between water temperature and fish resource density in autumn ( $r = -0.225$ ,  $P < 0.05$ ). In autumn, fish density increased with an increase in salinity, and in winter, fish density first increased and then decreased, reaching the maximum value at a salinity of 31.5. In spring, summer and autumn, chlorophyll was significantly correlated with fish resource density ( $P < 0.05$ ). Overall, the results showed that the fish resource density in autumn and winter was relatively lower than that in spring and summer in 2020. In spring, the fish resources in Wentai fishing ground were significantly greater than those in Yushan fishing ground. In summer, fish resources in Wentai and Yushan fishing grounds were relatively concentrated, primarily distributed at 27.8°~28.4°N, 121.7°~122.9°E and at 28.9°N, 122°E, respectively.

**Key words** Generalized additive models; Fishery resources; Resource distribution; Environmental factor; Offshore south of Zhejiang

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