



基于GAM的长江口鱼类资源时空分布及影响因素

马金^{1#}, 黄金玲^{2#}, 陈锦辉^{3*}, 李拜⁴, 赵静⁵,
高春霞⁵, 王学昉⁵, 田思泉⁵

- (1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;
2. 上海海洋大学海洋文化与法律学院, 上海 201306;
3. 上海市水生野生动植物保护研究中心, 上海 200092;
4. 缅因大学海洋科学学院, 美国奥罗诺 04469;
5. 上海海洋大学, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 研究根据2006至2017年长江口及其邻近海域鱼类资源调查, 运用广义加性模型 (generalized additive model, GAM) 探究了长江口鱼类资源密度与环境因子之间的关系, 并对2017年鱼类资源密度的时空分布进行预测。结果显示, 春夏秋冬四个季节最佳GAM偏差解释率分别为69.6%、55.9%、51.4%和47.4%, 交叉验证回归线斜率的平均效应为0.62~0.88。盐度、水温和溶解氧是影响长江口鱼类资源密度的主要环境影响因子且在不同季节对鱼类资源密度有不同的影响机制。总体上, 在春、夏、秋季, 盐度与鱼类资源密度之间存在正向相关性; 在夏、秋、冬季, 水温对鱼类资源密度有显著影响, 在秋季与鱼类资源密度之间存在正向相关性; 在春、秋、冬季, 溶解氧对鱼类资源密度有显著影响, 在冬季与鱼类资源密度之间存在正向线性相关。研究表明, 2017年, 夏季鱼类资源密度较高; 在长江口南支的自然延伸水域存在鱼类资源密度的相对低值, 在崇明岛向海自然延伸方向水域存在鱼类资源密度的相对高值。后续研究将对长江口鱼类资源进行不同生态类型区分, 以期更加准确地掌握影响各生态类型鱼类时空分布的环境因素及其时空分布信息。

关键词: 鱼类资源; 时空分布; 环境因子影响效应; 广义加性模型; 长江口
中图分类号: S 931 **文献标志码:** A

长江口是中国及西太平洋最大的河口, 温度、盐度等环境因素季节变化大, 初级生产力高, 吸引多种生态类型的鱼类在此栖息^[1], 也是很多洄游性鱼类的洄游通道和生理性适应缓冲场所^[2]。近年来, 由于过度捕捞、水体污染、河坝和海(河)岸建设等原因, 长江鱼类资源衰退严重^[3]。目前, 非线性模型在研究鱼类资源量与环境因子的关系^[4]及空间分布预测^[5-6]方面已经有较

为广泛的应用, 其中, 作为一种描述和展现响应变量和多个预测变量间非线性关系的回归分析方法, GAM具备较好的响应变量时空分布预测能力, 已被广泛应用于分析渔业资源密度分布及其与环境因子的关系^[7-9]。但是, 在渔业调查采样中, 受调查范围、目标鱼种聚集、采样网具选择性等原因影响, 在有的采样站点出现目标种的采样零值, 这给运用对数正态误差结

收稿日期: 2019-09-04 修回日期: 2020-01-17

资助项目: 国家自然科学基金(41606146); 上海市科委地方能力建设项目(18050502000); 长江口国家级海洋牧场示范区监测和效果评估项目(171015); 2014竹阵鱼礁海洋牧场示范区建设项目(140302)

通信作者: 陈锦辉, E-mail: 253855188@qq.com

作者简介: 马金, 黄金玲为共同第一作者

构的GAM的运行带来不便^[10], 而给零值的响应变量加上一个常量是解决此问题的一种主要方法^[11]。

环境因素在鱼类资源量的分布格局中起着非常重要的作用^[12], 鱼类资源量的时空分布格局及其与环境之间的关系一直是渔业生态学研究热点问题^[13], 如表层水温被认为与长江口秋季渔获种类数显著正相关^[14]; 盐度、溶解氧是影响长江口鱼类生物多样性的主要因子^[6]; 水深、盐度驱动鱼类群聚空间变异, 温度驱动了时间变异^[15]。诸多研究揭示不同环境条件下鱼类资源量的分布格局, 得到鱼类群落的空间分布特征及影响因素^[7, 12-13], 为鱼类群落采样设计^[16]、鱼类自然保护区建立与优化等管理策略的制定^[17]提供了理论参考和研究支撑。

因此, 作为制定渔业管理和保护政策的重要和有效信息来源, 在当前“长江大保护”的政策背景下, 了解和掌握鱼类资源时空分布信息及其与环境因子之间的关系显得尤为重要, 对长江口鱼类资源保护与恢复具有重要意义。本研究利用2006—2016年长江口及邻近海域鱼类资源调查数据, 运用GAM探究了长江口鱼类资源密度与环境因子之间的关系, 并对2017年鱼类资源分布进行预测, 以期对长江口鱼类资源的管理和保护提供理论参考和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源及处理

本研究鱼类资源量及环境数据来源于2006至2017年长江口渔业资源调查, 调查时间为5月(春季)、8月(夏季)、11月(秋季)和2月(冬季), 采样方式为定点采样, 每年设14~15个站点, 从2014年开始, 采样调查增加了17、18、19三个站点, 同时撤销了对2、8、10、12等4个站点的调查(图1)。受调查天气、海况等因素影响, 部分航次、站位未能开展调查。

调查网具为双囊底拖网, 网口宽6 m, 网高2 m, 网纲长6 m, 囊网网目大小为20 mm。作业航速为2 km/h, 作业时间为30 min。当渔获物数量较少时, 记录全部渔获物的种类、数量、重量、体长等数据, 渔获物数量较多时随机抽取一定比例的渔获物进行统计, 最后换算成全部渔获物的数量。

对渔业资源进行调查时, 同步测定了各站点环境数据。每个监测点涨、落潮各取一次水样, 取样层次按《海洋监测规范》(GB 17378.4-

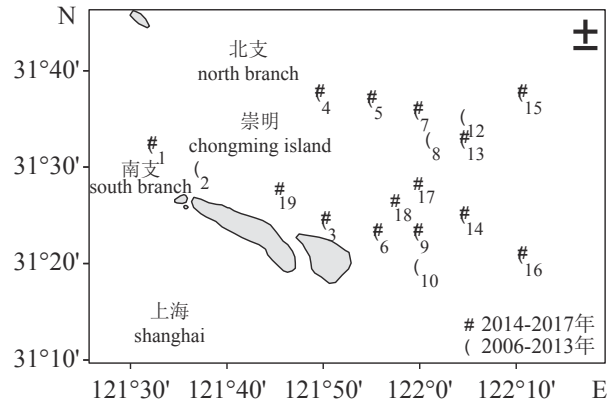


图1 长江口渔业资源采样站点分布

Fig. 1 Distribution of sampling stations in the Yangtze River estuary

1998)的要求确定, 当水深小于10 m时, 只取表层水样, 水深大于10 m时, 水样取表、底二层。表层水温(T, °C)、盐度(S)、PH和溶解氧(DO, mg/L)使用WTW Multi 3430水质测试仪测定, 各站点叶绿素a(Chl.a, µg/L)的测定使用有机玻璃采水器取表、底两层水样, 每层采500 mL水样, 在船上用0.45 µm混合纤维素酯滤膜进行减压抽滤, 并将截留浮游植物细胞的滤膜置于暗处, 低温、干燥保存, 水样带回实验室依照《海洋监测规范》并采用分光光度法测定叶绿素a含量。

1.2 广义加性模型

以每小时捕获的渔获尾数(N/h)^[14]作为GAM的响应变量, 它代表鱼类资源密度(density)的相对度量指标^[18]; 在响应变量的处理上, 鉴于响应变量零值的存在, 给响应变量加上一个常量(本文常量选为1)^[19], 使得以对数为连接函数的GAM得以适用。在预测变量的选择上, 经度和纬度常作为GAM建模的空间因子^[20]; 水温与长江口总渔获量密切相关^[14]; 长江口盐度与径流量的谱结构在各水文年基本一致^[21], 考虑到长江径流量对长江口鱼类群落结构的影响, 且径流量对盐度梯度的变化有最直接影响^[22], 使用盐度来表征径流量对鱼类群落结构的影响; 叶绿素、pH和溶解氧在各季节驱动了鱼类群落的时空变异^[15]。所以, 模型的预测变量包括经度、纬度、温度(T)、盐度(S)、叶绿素a(Chl.a)、PH和溶解氧(DO), GAM的全因子表达式为:

$$\ln(\text{density} + 1) = s(\text{Lat}) + s(\text{Lon}) + s(T) + s(S) + s(\text{Chl.a}) + s(\text{pH}) + s(\text{DO}) + \epsilon, \text{family} = \text{gaussian} \quad (1)$$

利用2006—2016年的调查数据构建模型，采用方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)分季节对预测变量进行共线性检验，选择VIF检验的临界值为3^[23]，VIF大于3的预测变量将被移除。将VIF检验后的所有预测变量以不同组合逐步放入GAM中，以赤池信息准则(akaike information criterion, AIC)来衡量模型拟合优度^[24]，从而得到最优模型。采用交叉验证对各季节最优模型的预测能力进行验证，总体数据被分为验证数据和训练数据两部分，选取验证数据(观测值)占总体数据的比例为：

$$1 / \left(1 + \sqrt{p - 1} \right)^{[25]} \quad (2)$$

其中， p 为预测变量的个数，其余数据作为训练数据用于模型运算；构建预测值($\ln y$)与观测值($\ln y'$)之间的线性关系：

$$\ln m y' = a + b \times \ln y \quad (3)$$

此过程重复100次， a 和 b 的均值反映预测偏差， $a=0$ 和 $b=1$ 表示预测值与观测值之间无偏差，模型预测性能最佳^[9]。

1.3 鱼类资源密度分布预测

根据2017年各季节各站点环境调查数据，以 $0.025 \times 0.025^\circ$ 为网格大小对研究水域进行网格划分，获得每个网格中心点的坐标，并运用克里金插值法获得网格中心点的环境数据。运用各季节最佳模型预测2017年相应季度鱼类资源密度分布。

预测变量的共线性检验、GAM的建立、交叉验证和模型预测利用R语言软件(V 3.6.0)完成。

2 结果

2.1 预测变量的共线性检验

7个预测变量中，纬度和盐度4个季度的

VIF值均大于3，经度等其余5个预测变量的VIF值均小于3(表1)。移除纬度后，经度等其余6个预测变量的VIF值均小于3(表1)。因此，除纬度以外6个预测变量用于GAM的建立。

2.2 模型选择及鱼类资源密度与环境因子之间的关系

每个季节，6个预测变量可建立 $C_6^1 + C_6^2 + C_6^3 + C_6^4 + C_6^5 + C_6^6 = 63$ 个不同变量组合的模型，选择AIC值最小的模型为最佳拟合模型。春季，最佳的预测变量组合为Lon+S+PH+DO，其中，盐度、酸碱度和溶解氧对鱼类资源密度大小有显著影响($P < 0.05$ ，表2)；模型偏差解释率为69.6%，其中，盐度的贡献率最大，为26.5%，其次为经度、溶解氧和酸碱度，分别为22.6%、12.4%和8.1%(表2)。夏季，最佳的预测变量组合为T+S+PH，其中，水温和盐度对鱼类资源密度大小有显著影响($P < 0.05$ ，表2)；模型偏差解释率为55.9%，其中，盐度的贡献率最大，为46.9%，其次为酸碱度和水温，分别为8.4%和0.6%(表2)。秋季，最佳的预测变量组合为Lon+T+S+Chl+PH+DO，其中，水温、盐度、酸碱度和溶解氧对鱼类资源密度大小有显著影响($P < 0.05$ ，表2)；模型偏差解释率为51.4%，其中，盐度的贡献率最大，为15.5%，其次为溶解氧、水温、叶绿素a、酸碱度和经度，分别为12.5%、12.0%、6.6%、4.0%和0.8%(表2)。冬季，最佳的预测变量组合为T+S+PH+DO，其中，水温和溶解氧对鱼类资源密度大小有显著影响($P < 0.05$ ，表2)；模型偏差解释率为47.4%，其中，水温和溶解氧对鱼类资源密度大小有显著影响($P < 0.05$ ，表2)；其次为溶解氧、酸碱度和盐度，分别为12.9%、3.6%和2.7%(表2)。

春季，盐度、酸碱度和溶解氧与鱼类资源密度之间存在多波峰的非线性关系(图2-a, b,

表 1 预测变量共线性检验结果

Tab. 1 Collinearity test for predictor variables

季节 season	经度 Lon	纬度 Lat	水温 T	盐度 S	溶解氧 DO	酸碱度 PH	叶绿素a Chl
春季 spring	1.87 (1.19)	5.55	1.97 (1.97)	4.17 (1.76)	1.78 (1.70)	1.16 (1.09)	1.35 (1.33)
夏季 summer	1.79 (1.20)	4.50	1.27 (1.23)	3.37 (1.57)	1.08 (1.08)	1.13 (1.13)	1.09 (1.08)
秋季 autumn	1.55 (1.13)	3.72	1.40 (1.39)	3.36 (1.21)	1.52 (1.51)	1.22 (1.19)	1.09 (1.08)
冬季 winter	1.69 (1.19)	4.25	1.52 (1.49)	3.87 (1.20)	1.45 (1.45)	1.47 (1.46)	1.90 (1.89)

注：*括号内的数值为移除纬度后预测变量的VIF值

Notes: the value in parentheses shows the VIF value of variables exclude the latitude

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	自由度 degree of freedom	P值 P value	AIC	累计偏差解释率 Accumulation of deviance explanation	因子偏差解释率 Deviance explanation of each factor
春季 spring	经度 Lon	2.117	0.110	427.43	22.6%	22.6%
	盐度 S	6.979	0.000		49.1%	26.5%
	酸碱度 PH	7.887	0.002		57.2%	8.1%
	溶解氧 DO	8.767	0.000		69.6%	12.4%
夏季 summer	水温 T	8.456	0.004	435.09	0.6%	0.6%
	盐度 S	7.193	0.000		47.5%	46.9%
	酸碱度 PH	6.958	0.107		55.9%	8.4%
秋季 autumn	经度 Lon	3.621	0.428	418.22	0.8%	0.8%
	水温 T	4.232	0.019		12.8%	12.0%
	盐度 S	6.479	0.014		28.3%	15.5%
	叶绿素 a Chl	3.814	0.061		34.9%	6.6%
	酸碱度 PH	1.000	0.004		38.9%	4.0%
	溶解氧 DO	8.255	0.001		51.4%	12.5%
冬季 winter	水温 T	8.853	0.002	324.87	28.2%	28.2%
	盐度 S	4.733	0.257		30.9%	2.7%
	酸碱度 PH	4.293	0.246		34.5%	3.6%
	溶解氧 DO	1.000	0.021		47.4%	12.9%

c)。总体上, 盐度对鱼类资源密度有正向的影响(图2-a); 酸碱度为7.5~8时, 鱼类资源密度较高(图2-b)。夏季, 在24~25 °C的水温范围内, 鱼类资源密度较高(图2-d); 盐度对鱼类资源密度有正向的影响(图2-e)。秋季, 在8~20 °C的水温范围内, 水温与鱼类资源密度之间存在正相关的非线性关系(图2-f); 在7.5~10.5范围内, 酸碱度与资源密度之间存在负相关的非线性关系(图2-h)。冬季, 在6~12 °C的范围内, 水温与资源密度的关系存在双波峰的非线性关系, 在7 °C和9 °C存在两个资源密度的高峰值, 在8 °C和10 °C存在两个资源密度的低值(图2-j); 在9~13 mg/L的浓度范围, 溶解氧与鱼类资源密度之间线性正相关(图2-k)。

2.3 模型的预测性能

交叉验证结果显示, 春季, 交叉验证线性回归斜率平均值为0.78, 截距均值为0.88, 决定系数(r^2)均值为0.36(图3); 夏季, 交叉验证线性回归斜率平均值为0.79, 截距均值为0.9, 决定系

数(r^2)均值为0.27(图3); 秋季, 最佳GAM的交叉验证线性回归斜率平均值为0.62, 截距均值为1.23, 决定系数(r^2)均值为0.29(图3); 冬季, 最佳GAM的交叉验证线性回归斜率平均值为0.88, 截距均值为0.3, 决定系数(r^2)均值为0.25(图3)。

2.4 长江口鱼类资源密度的时空分布

时间尺度上, 2017年夏季, 长江口鱼类资源密度最高, 其他3个季节的鱼类资源密度相对较低(图4)。空间分布上, 各季节, 在长江口南支的自然延伸水域存在鱼类资源密度的相对低值, 在崇明岛外围、向海自然延伸方向的水域则存在鱼类资源密度的相对高值(图4); 总体上, 除冬季外, 鱼类资源密度在其他3个季节皆呈现出北支河口略高于南支河口的现象(图4)。此外, 在春季, 鱼类资源密度呈现出明显的“北高南低”的分布格局, 资源密度高值出现在长江口北部水域; 夏季, 长江口外侧水域的资源密度高于长江口内侧水域(图4)。

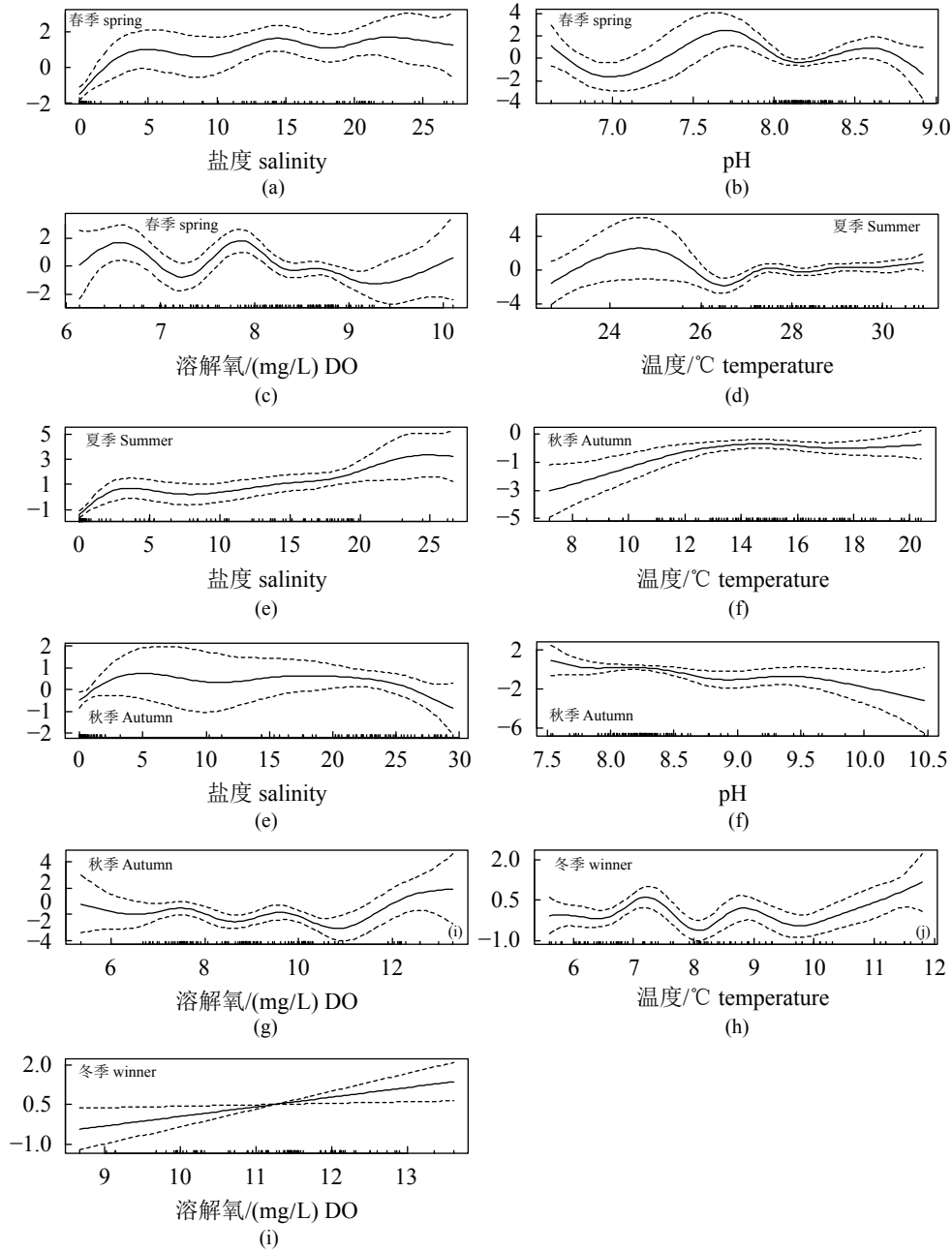


图 2 各季节最佳GAM中环境因子与鱼类资源密度的关系

Fig. 2 Relationship between each significant factor and fish density in each optimal GAM in each season

3 讨论

3.1 GAM方法分析

GAM的建立可以分为预测变量的共线性检测、最佳拟合模型的筛选、最佳模型预测性能验证和预测等步骤。VIF检验结果显示，纬度和盐度的VIF值都大于临界值3(表1)，考虑盐度被广泛认为是影响河口水域对渔业资源时空分布的重要环境因子^[6, 14]，所以，本文将纬度舍去，使用盐度等其余6个环境因子作为预测变量进行

GAM建立。交叉验证是评判GAM等物种分布模型预测能力的常用方法^[26]。本文四个季节的GAM100次交叉验证的线性回归结果显示，100次线性回归的平均效应与1:1的回归线正交线存在系统偏差，这可能会对预测变量的空间分布预测带来偏差^[9]，但总体上预测值与观测值之间的关系为正相关，且100次回归线的斜率的平均效应为0.62~0.88，模型对鱼类资源的空间分布预测仍具有相对较高的准确度。数据量的不足或者重要解释变量的缺失也会导致模型的拟合性能和预测性

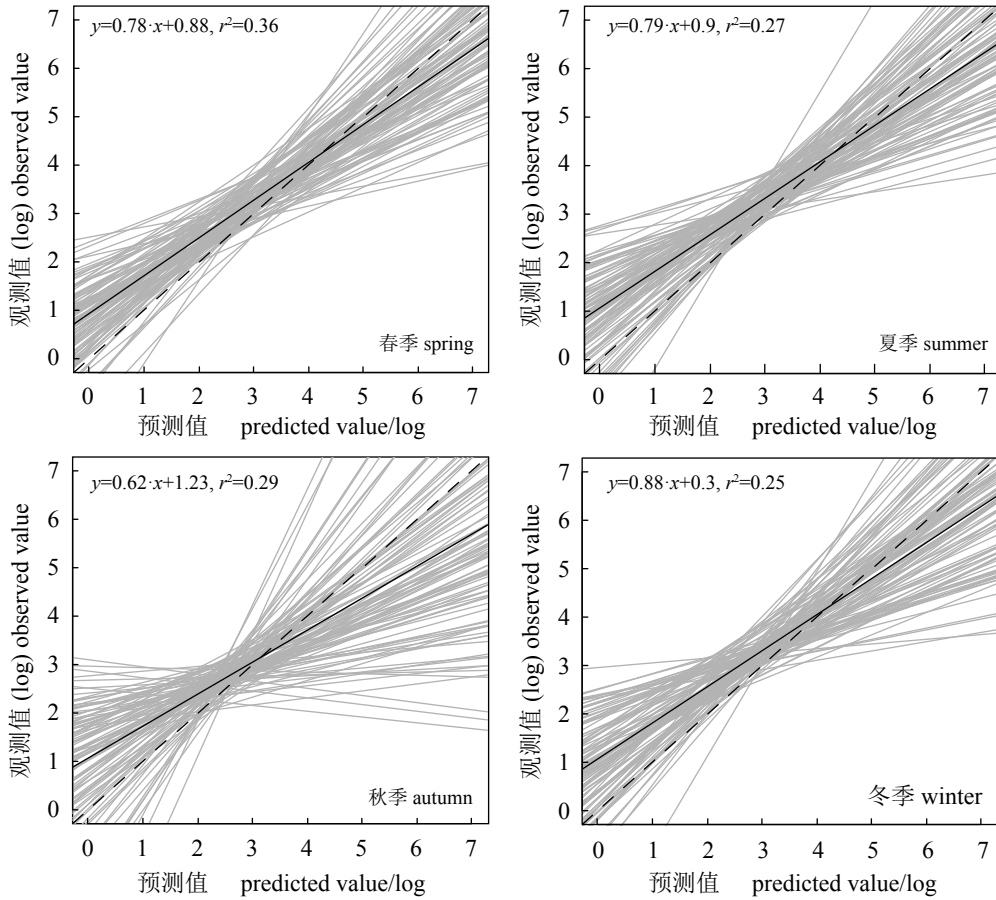


图3 各季度GAM的交叉验证线性回归

灰色实线为100次交叉验证的回归线, 黑色实线为100次交叉验证的平均效应, 黑色虚线为1:1线

Fig. 3 Linear regression of cross validation test for GAM in each season

(The light gray solid lines are 100 linear regression lines, the black solid line is the mean of cross validation results, and the black dashed line is the 1:1 line.

能不能够理想^[27], 在河口水域, 河水径流量^[22]、潮汐^[28]对鱼类资源量和分布有重要影响, 这些因素也应得到充分考虑。除非生物因子外, 生物

因子对目标物种的潜在分布也会产生重要影响, 如浮游植物密度对鱼类资源丰度的影响^[20], 此外, 利用生物之间的相互关系(如捕食与被捕食

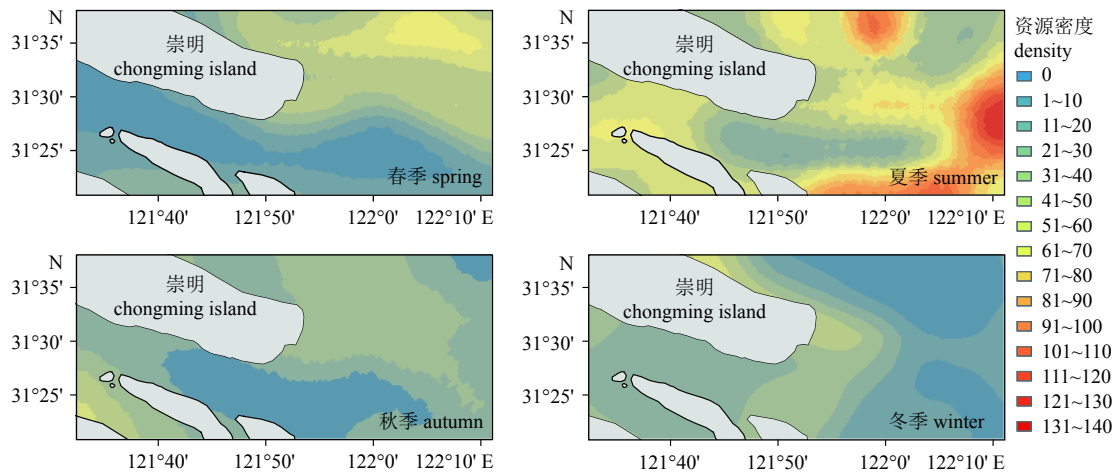


图4 2017年各季度鱼类资源密度预测值空间分布(尾/小时)

Fig. 4 Spatial distribution of predicted value of fish density in each season of 2017 (N/h)

关系)也可间接推测目标种的资源空间分布, GAM的此类研究可以将捕食-被捕食关系纳入进来^[18, 29]。

3.2 长江口鱼类资源密度空间分布及影响因素

长江口鱼类丰度具有明显的季节变化特征^[30]。研究发现, 夏季鱼类资源密度较高, 冬季则偏低。季节变换产生的温度的变化会导致鱼类群落产生差异, 随着温度的变化, 鱼类群落的种类多样性^[22]、丰富度^[31]在冬季最低, 春季逐渐增加, 而在夏季或者秋季达到最高值; 此外, 张衡等^[30]研究认为夏季鱼类丰度较高的原因与幼鱼个体数增多有关, 这或许是夏季鱼类资源密度相对较高的原因, 这需要在今后的数据采集过程中加强对渔获资源个体生长阶段的鉴别, 并对此观点进行验证。各季节, 在长江口南支的自然延伸水域存在鱼类资源密度的相对低值, 在个别季节, 长江口渔业资源密度呈现“北高南低”的分布格局(图4春季), 这在长江口鱼类资源多样性和丰富度指数的研究中有相同结果^[7]。南支水域船只通航频繁, 长江口深水航道治理工程的实施一定程度上破坏了水域生态环境^[32], 这或许是造成该水域鱼类资源密度较低的原因。崇明岛外围向海自然延伸水域设有崇明东滩鸟类自然保护区、上海市长江口中华鲟自然保护区等水生生物自然保护区, 保护区对水域自然环境和鱼类资源有保护效应, 这或能解释在崇明岛向海自然延伸水域存在鱼类资源密度的相对高值。在长江口, 已有较多研究表明, 长江口外侧水域的鱼类群落多样性指数和丰富度指数明显高于长江口内侧水域^[7, 33], 本研究也得到了类似结果, 初级生产力从口内到口外逐渐升高^[34]、盐度变化对淡水鱼类的限制^[7]被认为是与此有关的原因。研究发现, 盐度、水温和溶解氧是主要的环境影响因素且在不同季节对鱼类资源密度有不同的影响机制, 但很难得出一致的结论。本研究中, GAM的响应变量为所有鱼类的资源密度, 这或许增加了模型解释变量对响应变量解释的复杂性, 对鱼类进行不同生态类型的区分然后建立模型或能更加准确把握环境因子对鱼类资源密度的影响机制。在河口水域, 鱼类季分布和环境季节性变化特征明显, 分季节建立模型与这一特征相匹配, 但同时削弱了水温的季节变化对鱼类分布的影响, 这或许是盐度等主要环境因子在不同季节对鱼类资源密度有不同影响机制的原因。

在河口水域, 盐度被认为是影响鱼类数目及个体分布的最主要因素, 盐度对于不同站点的资源密度有着不同的影响, 这是因为随着盐度的变化, 河口内外栖息的鱼类生态类型已发生变化^[32], 对盐度的不同耐受范围决定了不同生态类型的鱼类栖息于河口的不同水域^[35]。总体上, 盐度与鱼类资源密度之间存在正向相关性, 这与海洋鱼类和河口咸淡水鱼类为长江口优势种^[30, 32]相对应。

在长江口, 水温与渔获种类数、总渔获量关系密切^[14], 水温通过影响鱼类种类组成的季节变化来影响鱼类群落组成^[35], 同时, 水温影响洄游性鱼类的洄游活动和发生量^[30], 如在5—9月, 海洋洄游性鱼类在种类数目和生态类群尾数上皆占首位^[1], 因此成为影响长江口鱼类资源分布的重要因素之一。在单个季节, 在长江口及邻近海域的不同水域, 水温不存在显著差异^[32], 但在不同季节间差异显著, 本研究按照季节分别建立模型, 可能改变了温度变化的时间连续性, 后续研究将开展年度内逐月调查, 或能从更大的温度跨度范围内了解水温对鱼类资源的影响。

溶解氧最显著的影响是引起鱼类数量和空间分布的变化^[36]。本研究发现, 在冬季, 溶解氧与鱼类资源密度之间存在显著的正向线性相关, 这与Hajisamae等^[37]研究一致。而在春季和秋季, 溶解氧对鱼类资源密度的影响复杂多变, 呈现多次波动的非线性关系, Rakocinski等^[38]认为溶解氧与盐度、温度的梯度变化共同影响了鱼类群落结构的变动。

在使用模型解析鱼类群落特征与环境因子之间关系时, 响应变量的选取对结果影响较大, 尤其是在受河水径流和潮汐影响的河口水域。长江口河口内和河口外的栖息鱼类存在生态类型(如海洋鱼类、淡水鱼类)的差别^[32], 鱼类的生态类型组成和多样性受长江径流量的季节变动呈现明显的季节差异^[33]。后续研究应考虑将长江口鱼类进行不同生态类型的区分后, 分季节建立不同生态类型鱼类与环境因子之间的模型, 或可以更加准确了解和掌握影响各生态类型鱼类时空分布的环境因素, 进而更有针对性地开展长江口鱼类资源的研究、管理和保护工作。

参考文献:

- [1] 沈新强, 史赞荣, 晁敏, 等. 夏、秋季长江口鱼类群落结构[J]. 水产学报, 2011, 35(5): 700-710.
Shen X Q, Shi Y R, Chao M, *et al.* Fish community structure of the Yangtze River Estuary in summer and autumn[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(5): 700-710(in Chinese).
- [2] 史赞荣, 晁敏, 沈新强. 长江口张网鱼类群落结构特征及月相变化[J]. 海洋学报, 2014, 36(2): 81-92.
Shi Y R, Chao M, Shen X Q. Characteristics and monthly variations of set net fish community structure in the Changjiang River estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(2): 81-92(in Chinese).
- [3] 张敏莹, 徐东坡, 刘凯, 等. 长江下游刀鲚生物学及最大持续产量研究[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(6): 694-698.
Zhang M Y, Xu D P, Liu K, *et al.* Studies on biological characteristics and change of resource of *Coilia nasus* schlegel in the lower reaches of the yangtze river[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(6): 694-698(in Chinese).
- [4] 郭弘艺, 张旭光, 唐文乔, 等. 长江靖江段刀鲚捕捞量的时间变化及相关环境因子分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(12): 1850-1859.
Guo H Y, Zhang X G, Tang W Q, *et al.* Temporal variations of *Coilia nasus* catches at Jingjiang section of the Yangtze river in fishing season in relation to environmental factors[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(12): 1850-1859(in Chinese).
- [5] 佟佳琦, 陈锦辉, 高春霞, 等. 基于栖息地适应性指数的长江口刀鲚时空分布特征[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(4): 584-593.
Tong J Q, Chen J H, Gao C X, *et al.* Temporal-spatial distribution of *Coilia nasus* in the Yangtze River Estuary based on habitat suitability index[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2018, 27(4): 584-593(in Chinese).
- [6] 戴黎斌, 陈锦辉, 田思泉, 等. 基于CART算法的长江口鱼种丰富度预测[J]. 中国水产科学, 2018, 25(5): 1082-1090.
Dai L B, Chen J H, Tian S Q, *et al.* Prediction of fish species richness in the Yangtze River estuary using CART algorithm[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(5): 1082-1090(in Chinese).
- [7] 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[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 644-652.
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[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 644-652(in Chinese).
- [8] 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[J]. 海洋湖沼通报, 2007(2): 104-113.
Chen X J, Tian S Q. Effects of SST and temp-spatial factors on abundance of nylon flying squid *Ommastrephes bartrami* in the northwestern Pacific using generalized additive models[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2007(2): 104-113(in Chinese).
- [9] Li B, Cao J, Chang J H, *et al.* Evaluation of effectiveness of fixed-station sampling for monitoring American lobster settlement[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2015, 35(5): 942-957.
- [10] 李增光. 基于GAM模型的南黄海帆张网主要渔获物分布及海州湾鱼卵、仔稚鱼集群特征的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
Li Z G. Distribution of main species of stow net in the South Yellow Sea based on GAM and preliminary study of characteristics of ichthyoplankton assemblages in Haizhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013(in Chinese).
- [11] Porch C E, Scott G P. A numerical evaluation of GLM methods for estimating indices of abundance from West Atlantic bluefin tuna catch per trip data when a high proportion of the trips are unsuccessful[J]. ICCAT Collective Volume of Scientific Papers, 1994, 42(1): 240-245.
- [12] 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[J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3226-3235.
Zhao J, Zhang S Y, Wang Z H, *et al.* Fish community diversity distribution and its affecting factors based on GAM model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(12): 3226-3235(in Chinese).
- [13] 栾静, 张崇良, 徐宾铎, 等. 海州湾双斑螭栖息分布特征与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2018, 42(6): 889-901.

- 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(in Chinese).
- [14] 孙鹏飞, 戴芳群, 陈云龙, 等. 长江口及其邻近海域渔业资源结构的季节变化[J]. *渔业科学进展*, 2015, 36(6): 8-16.
- Sun P F, Dai F Q, Chen Y L, *et al.* Seasonal variations in Structure of fishery resource in the Yangtze river estuary and its adjacent waters[J]. *Progress in Fishery Science*, 2015, 36(6): 8-16(in Chinese).
- [15] 张迎秋. 长江口近海鱼类群落环境影响分析[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2012.
- Zhang Y Q. Environmental impact on the fish assemblage structure in adjacent sea area of the Yangtze river estuary[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2012(in Chinese).
- [16] 赵静, 章守宇, 林军, 等. 不同采样设计评估鱼类群落效果比较[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 1181-1187.
- Zhao J, Zhang S Y, Lin J, *et al.* A comparative study of different sampling designs in fish community estimation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4): 1181-1187(in Chinese).
- [17] 黄心一, 李帆, 陈家宽. 基于系统保护规划法的长江中下游鱼类保护区网络规划[J]. *中国科学: 生命科学*, 2016, 59(3): 312-324.
- Huang X Y, Li F, Chen J K. Reserve network planning for fishes in the middle and lower Yangtze River basin by systematic conservation approaches[J]. *Science China Life Sciences*, 2016, 59(3): 312-324.
- [18] Yalçın E, Gurbet R. Environmental influences on the spatio-temporal distribution of European Hake (*Merluccius merluccius*) in Izmir Bay, Aegean Sea[J]. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2016, 16(1): 1-14.
- [19] Tian S Q, Chen X J, Chen Y, *et al.* Standardizing CPUE of *Ommastrephes bartramii* for Chinese squid-jigging fishery in Northwest Pacific Ocean[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27(4): 729-739.
- [20] 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鲈资源丰度的影响[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(5): 963-969.
- 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[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(5): 963-969(in Chinese).
- [21] 沈焕庭, 王晓春, 杨清书. 长江河口径流与盐度的谱分析[J]. *海洋学报*, 2000, 22(4): 17-23.
- Shen H T, Wang X C, Yang Q S. The spectrum analysis of discharge and salinity in the Changjiang Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(4): 17-23(in Chinese).
- [22] 黄良敏, 张会军, 张雅芝, 等. 入海河口鱼类生物与水环境关系的研究现状与进展[J]. *海洋湖沼通报*, 2013(1): 61-68.
- Huang L M, Zhang H J, Zhang Y Z, *et al.* Research and progress of relationship between fish and aquatic environmental factors in estuarine waters[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2013(1): 61-68(in Chinese).
- [23] 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[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2014, 71(6): 847-877.
- [24] Planque B, Bellier E, Lazure P. Modelling potential spawning habitat of sardine (*Sardina pilchardus*) and anchovy (*Engraulis encrasicolus*) in the Bay of Biscay[J]. *Fisheries Oceanography*, 2007, 16(1): 16-30.
- [25] Franklin J, Miller J A. Mapping Species Distributions. Spatial Inference and Prediction[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 212.
- [26] Jensen O P, Seppelt R, Miller T J, *et al.* Winter distribution of blue crab *Callinectes sapidus* in Chesapeake Bay: Application and cross-validation of a two-stage generalized additive model[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 299: 239-255.
- [27] 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[J]. *极地研究*, 2012, 24(3): 266-273.
- 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 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- environmental factors based on a generalized additive model[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2012, 24(3): 266-273(in Chinese).
- [28] 张衡, 何文珊, 童春富, 等. 崇西湿地冬季潮滩鱼类种类组成及多样性分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(3): 308-313.
Zhang H, He W S, Tong C F, *et al.* Species composition and biodiversity of the intertidal fishes in Chongxi wetland in winter in Changjiang estuary[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(3): 308-313(in Chinese).
- [29] Smout S, Lindstrom U. Multispecies functional response of the minke whale *Balaenoptera acutorostrata* based on small-scale foraging studies[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, 341: 277-291.
- [30] 张衡, 杨胜龙, 张胜茂, 等. 长江口东滩湿地东北水域鱼类群落种类组成和丰度的季节变化[J]. *海洋渔业*, 2016, 38(4): 374-382.
Zhang H, Yang S L, Zhang S M, *et al.* Seasonal changes of fish community composition and abundance in the northeast Dongtan Wetland in the Yangtze Estuary[J]. *Marine Fisheries*, 2016, 38(4): 374-382(in Chinese).
- [31] 吴美琴, 钟俊生, 葛珂珂, 等. 长江口沿岸碎波带仔稚鱼分布的季节性变动[J]. *渔业科学进展*, 2010, 31(1): 1-7.
Wu M Q, Zhong J S, Ge K K, *et al.* Seasonal fluctuation of fish larvae and juveniles distribution in the surf zone of the Yangtze River estuary[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(1): 1-7(in Chinese).
- [32] 史赞荣, 晁敏, 全为民, 等. 2010年春季长江口鱼类群落空间分布特征[J]. *中国水产科学*, 2011, 18(5): 1141-1151.
Shi Y R, Chao M, Quan W M, *et al.* Spatial variation in fish community of Yangtze River estuary in spring[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, 18(5): 1141-1151(in Chinese).
- [33] 史赞荣, 晁敏, 全为民, 等. 长江口鱼类群落的多样性分析[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(6): 1051-1059.
Shi Y R, Chao M, Quan W M, *et al.* Fish community diversity analyses in the Yangtze River estuary, China[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(6): 1051-1059(in Chinese).
- [34] 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[J]. *海洋学报*, 2004, 26(3): 143-150.
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[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(3): 143-150(in Chinese).
- [35] 张衡, 朱国平. 长江河口潮间带鱼类群落的时空变化[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(10): 2519-2526.
Zhang H, Zhu G P. Spatiotemporal changes of fish community in Yangtze estuary intertidal zone[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(10): 2519-2526(in Chinese).
- [36] 韩德举. 泰晤士河口水温和水化学特性对鱼类的影响研究[J]. *水利水电快报*, 2006, 27(24): 55-66.
Han D J. Relative effects of water temperature and water chemistry on the fish of the Thames Tideway[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2006, 27(24): 55-66(in Chinese).
- [37] Hajisamae S, Yeasin P. Patterns in community structure of trawl catches along coastal area of the South China Sea[J]. *The Raffles Bulletin of Zoology*, 2010, 58(2): 357-368.
- [38] Rakocinski C F, Lyczkowski-Shultz J, Richardson S L. Ichthyoplankton assemblage structure in Mississippi sound as revealed by canonical correspondence analysis[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 43(2): 237-257.

Analysis of spatiotemporal fish density distribution and its influential factors based on generalized additive model (GAM) in the Yangtze estuary

MA Jin^{1#}, HUANG Jinling^{2#}, CHEN Jinhui^{3*}, LI Bai⁴, ZHAO Jing⁵,
GAO Chunxia⁵, WANG Xuefang⁵, TIAN Siquan⁵

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. College of Marine Culture and Law, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Center for protection and research of aquatic wild living plants and animals in Shanghai, Shanghai 200092, China;

4. School of Marine Sciences, University of Maine, Orono 04469, USA;

5. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Understanding the relationship between fisheries resources and environmental factors, also the spatial and temporal distribution of fisheries resources, plays an important role in the process of making fishery management and protection strategies. Under the policy background of “the Yangtze River Great Protection”, carrying out such research has an important ecological significance for fisheries protection and recovery in the Yangtze estuary. Based on the survey data from 2006 to 2017 in the Yangtze estuary, relationship between fish density and environmental factors was conducted based on GAM, meanwhile, the seasonal distribution of fish density in 2017 was predicted. The results showed that explained deviance in the seasonal optimal model was 69.6%, 55.9%, 51.4% and 47.4% respectively, the mean slope of regression line of 100-time cross validation ranged from 0.62 to 0.88. Salinity, water temperature and dissolved oxygen (DO) were found to be the significant environmental factors. In general, in Spring, Summer and Autumn, salinity was considered to have a positive relationship with fish density. In Summer, Autumn and Winter, water temperature was found to be the significant environmental factor, and in Autumn, a positive relationship was found. In Spring, Autumn and Winter, DO was found to be the significant environmental factor, and in Winter, a positive linear relationship was found. In 2017, there was a relative high value of fish density in summer. In the four seasons, relatively low value of fish density was found to exist in the natural extension waters of the southern branch of the Yangtze estuary. In the natural extension waters of Chongming Island to the sea, the fish density is relatively higher.

Key words: fisheries resources; spatiotemporal distribution; impacts of environmental factors; Generalized additive models; the Yangtze estuary

Corresponding author: CHEN Jinhui. E-mail: 253855188@qq.com

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (41606146); Shanghai Municipal Science and Technology Commission Local Capacity Construction Project, China (18050502000); Monitoring and Evaluation of National Sea Ranch Demonstration area Project in Yangtze River Estuary (171015); Bamboo Reef Construction Project in Shanghai Sea Ranch Demonstration Area (140302)