

简盈, 张云雷, 宋业晖, 等. 为例——以山东近海多鳞鳕为例[J]. 海洋学报, 2022, 44(7): 103–111, doi:10.12284/hyxb2022146
Jian Ying, Zhang Yunlei, Song Yehui, et al. Effect of environmental factors on fish distribution based on GAM and GWR model: A case study of *Sillago sihama* in the Shandong coastal waters[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(7): 103–111, doi:10.12284/hyxb2022146

基于 GAM 和 GWR 模型分析环境因子 对鱼类分布的影响 ——以山东近海多鳞鳕为例

简盈^{1,3}, 张云雷^{1,3}, 宋业晖^{1,3}, 张崇良^{1,3}, 纪毓鹏^{1,3}, 任一平^{1,2,3*}

(1. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 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: 多鳞鳕 (*Sillago sihama*) 是山东近海重要的渔业种类之一。本研究根据 2016 年秋季 (10 月) 在山东近海开展渔业资源底拖网调查取得的数据, 分析该海域多鳞鳕的空间分布特征, 并运用广义可加模型 (GAM) 和地理加权回归 (GWR) 模型探究影响其分布的因素及其与环境因子的非线性和空间非平稳性关系。GAM 拟合结果显示, 影响秋季多鳞鳕分布的环境因子主要有水深、底层水温和底层盐度, 水深的偏差解释率最大, 为 23.50%。GWR 模型拟合结果显示, 多鳞鳕分布与水深和底层水温之间存在空间非平稳性关系。水深与多鳞鳕相对资源量呈负相关关系, 底层水温与多鳞鳕相对资源量呈正相关关系。赤池信息准则和决定系数 (R^2) 指标对比结果显示, GWR 模型的表现优于 GAM, 在渔业生态数据分析中表现出较好的发展潜力。本研究为今后开展渔业生物空间分布提供了一种新的方法。

关键词: 多鳞鳕; 地理加权回归模型; 广义可加模型; 空间非平稳性; 空间分布

中图分类号: S932.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)07-0103-09

1 引言

多鳞鳕 (*Sillago sihama*), 隶属于鲈形目 (Perciformes)、鳕科 (Sillaginidae)、鳕属 (*Sillago*), 为体长约 20 cm 的小型海洋鱼类, 多分布在河口和近岸水域^[1]。多鳞鳕属于沿海暖水性底层鱼类, 多栖息于沙泥和沙砾的海域, 其肉质鲜美、商业价值高^[2]。多鳞鳕是底栖生物食性鱼类, 主要摄食多毛类和端足类, 在生态系统物质循环和能量流动中有重要意义^[3]。目前对多鳞鳕的研究主要集中在基因、摄食、生长和死亡参数估算、早期发育形态等方面^[1,3-5]。有关多鳞鳕栖息地的研究罕见报道。栖息地为鱼类的生长提供适宜的

物及非生物环境, 直接或间接影响鱼类的行为、丰度、渗透压调节、新陈代谢等^[6-7]。此外, 栖息地的丧失还可能导致生态系统的失调。

广义可加模型 (Generalized Additive Model, GAM) 通常用于研究物种分布和环境因素之间的关系, 如李迎冬等^[8]使用 GAM 探究不同季节山东半岛南部海域小黄鱼 (*Larimichthys polyactis*) 分布与环境因子的关系; 朱文斌等^[9]基于 GAM 分析了浙江沿岸日本鳀 (*Engraulis japonicus*) 幼鱼资源量受环境因子影响发生的变动。GAM 在分析数据之前, 通常假定环境变量对物种分布的影响是恒定的, 即假设变量间具有空间平稳性或者同质性^[10]。然而, 在一个大的空间尺度

收稿日期: 2021-12-21; 修订日期: 2022-03-23。

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFD0901204)。

作者简介: 简盈 (1996—), 女, 福建省漳州市人, 主要从事渔业生态学研究。E-mail: jianying2536@163.com

* 通信作者: 任一平, 教授, 博士生导师, 主要从事渔业资源生态学研究。E-mail: renyip@ouc.edu.cn

上,空间平稳性并不总是存在,特别是在海洋生态系统,水生生物的高度流动性和生物与环境变量之间的空间变化关系,使空间非平稳性比空间平稳性可能性更高^[11]。

地理加权回归 (Geographically Weighted Regression, GWR) 模型本质上是改进的全局回归模型,是空间数据分析方法之一。根据采样点的坐标, GWR 模型在每个空间位置拟合出一个局部回归方程,从而得出各解释变量与响应变量关系的局部回归系数^[12]。与 GAM 相比, GWR 模型更适合用于研究物种分布与环境因子间的空间异质性,而不是在整个研究区域内只得到一个全局平均回归参数。GWR 模型被广泛应用于陆地上相关的研究,如杨道遥等^[13]使用 GWR 模型研究西安市共享单车分布情况与各影响因素的关系;丁亚鹏等^[14]基于 GWR 模型分析了伊河流域土壤有机碳空间分布与影响因素间的关系,并探讨影响因素的空间异质性;而其在海洋生物上的研究较少。Windle 等^[15]最早应用 GWR 模型探讨了海洋物种大西洋鳕鱼 (*Atlantic cod*) 分布与环境因子和生物因子的关系,并讨论了 GWR 模型在渔业生态学研究上的优势。

本研究利用 2016 年秋季在山东近海开展的渔业资源底拖网调查数据,使用 GAM 和 GWR 模型探讨环境因子对多鳞鳕分布的影响,旨在了解多鳞鳕数量

空间分布特征,比较 GAM 与 GWR 模型的分析效果,以期开展渔业生物空间分布研究提供新思路、新方法,为多鳞鳕资源的科学养护和管理提供基础。

2 材料与方法

2.1 数据来源

多鳞鳕样品来自 2016 年秋季(10 月)在山东近海进行的渔业资源底拖网调查,调查海域为 35°~38.5°N, 118°~124°E。将调查海域分为莱州湾海域(A 区)、烟威渔场及其邻近海域(B 区)、山东近海南部及其邻近海域(C 区),3 个海域同时开展调查(图 1)。采用定点设站的方法来进行渔业资源调查,A 区设置 48 个站位,B 区设置 51 个站位,C 区设置 63 个站位。调查船为 220 kW 单拖渔船,拖速为 3.0 kn,每站拖曳时间约为 1 h,拖网调查均安排在白天进行。拖网网具网口高度约为 7.53 m,宽约为 15 m,囊网网目大小为 17 mm。同时,采用 RBR-XR-420 型 CTD 采集每个站位的水深(Depth)、底层海水温度(Sea Bottom Temperature, SBT)、底层海水盐度(Sea Bottom Salinity, SBS)。本次调查均按《海洋调查规范第 6 部分:海洋生物调查》(GB/T 12763.6-2007)^[16]进行样品鉴定,获取多鳞鳕的密度和生物量等数据。依据拖网时间 1.0 h 和拖速 3.0 kn 进行调查数据标准化处理,获得各调查站位多鳞鳕相对资源量(单位: g/h)^[17]。

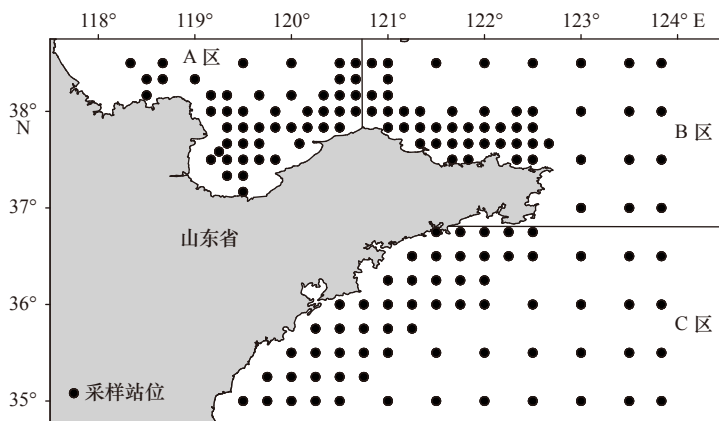


图 1 山东近海渔业资源底拖网调查区域

Fig. 1 Bottom trawl survey areas for fishery resources in the Shandong coastal waters

2.2 分析方法

为了避免环境变量之间的共线性,通过方差膨胀因子 (Variance Inflation Factor, VIF) 函数检验环境变量之间的关系,筛选出适合加入模型的因子。一般认为,当 VIF>4 时,变量存在共线性^[18],因此,在建模前去除导致共线性的解释变量。

本研究应用 GAM 对多鳞鳕相对资源量和环境因

子进行分析^[19]。GAM 利用非参数的方法灵活处理数据间的复杂联系,通过样条平滑函数反映响应变量与解释变量之间的关系。GAM 的一般表达式^[20]为

$$g(Y) = \alpha + \sum_{j=1}^n f_j(x_j) + \varepsilon, \quad (1)$$

式中, Y 是多鳞鳕相对资源量(单位: g/h); $g(Y)$ 为联系函数,本文采用自然对数; x_j 为解释变量,即各站位

的环境因子; α 为函数截距; $f_i(x_i)$ 为平滑函数; ε 表示随机误差。

GWR 模型既能描述响应变量与解释变量之间的关系, 又能反映空间异质性。它将数据的地理位置嵌入到回归参数中, 通过每个空间位置分配的权重不同, 从而在每个观测点都进行局部回归。GWR 模型的一般表达式^[21]为

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^t \beta_k(u_i, v_i)x_{ki} + \varepsilon_i, \quad (2)$$

式中, u_i 是第 i 个采样点的纬度数据; v_i 是第 i 个采样点的经度数据, 即 (u_i, v_i) 是第 i 个采样点的经纬度坐标; $\beta_0(u_i, v_i)$ 是第 i 个采样点回归常数; β_k 是第 i 个采样点的第 k 个待估回归参数; x_{ki} 为第 i 个点上第 k 个变量的观测值; t 为解释变量的个数; ε_i 是第 i 个采样点的随机误差。

GWR 模型的空间权重函数决定着局部回归系数等参数值, 本文采用 Gauss 函数法来确定权重函数和带宽, 其公式^[22]为

$$w_{ij} = \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{\theta^2}\right), \quad (3)$$

式中, i 为预测点; j 为观测点; w_{ij} 为观测点 j 在预测点 i 的权重; d_{ij} 为 i, j 两点间的距离; θ 为带宽, 是描述权重与距离之间函数关系的非负数衰减参数。带宽的大小影响着 GWR 模型的分析结果, 如局部回归系数值等。本研究基于赤池信息准则 (Akaike Information Criterion, AIC) 的自动黄金分割搜索方法选取最优带宽, 即带宽最好的模型 AIC 值最低。

在模型拟合过程中, 依照 AIC^[23]、决定系数 (R^2)^[15] 和偏差解释率 (Deviance Explained, DE)^[15] 评价模型效果, 根据逐步回归的方法依次将因子加入模型中。AIC 值越低, R^2 和 DE 越高, 表明模型的拟合效果越好。

AIC 公式为

$$\text{AIC} = D + 2d_f\varphi, \quad (4)$$

式中, D 为偏差 (残差平方和); φ 为离差参数 (方差); d_f 为有效自由度。

以上模型构建过程均在 R4.0.3 软件中实现, 其中 GAM 由 mgcv 包构建, GWR 模型由 spgwr 包构建, 各回归系数空间变化的显著性检验使用 GWmodel 包实现。

3 结果

3.1 模型构建

根据 VIF 检验, 水深、底层海水盐度和底层海水温度的 VIF 值分别为 1.57、2.17、1.51, 均小于 4, 故本研究选取水深、底层海水盐度和底层海水温度 3 个环

境变量参与构建模型。

根据 AIC、DE 和 R^2 , 采用逐步回归分析, 最终选择水深 (Depth)、底层海水盐度 (SBS) 和底层海水温度 (SBT) 作为解释变量, 多鳞鱈相对资源量作为响应变量共同构建最优 GAM。表达式为

$$\lg(Y+1) = \alpha + s(\text{Depth}) + s(\text{SBS}) + s(\text{SBT}) + \varepsilon, \quad (5)$$

式中, $s(\cdot)$ 为自然样条平滑函数。其迭代过程如表 1 所示, 最优 GAM 的 AIC 值为 168.113, 偏差解释率为 31.87%, R^2 值为 0.285。

表 1 GAM 变量筛选及影响因子的参数分析

Table 1 The variable screening process for GAM and parameters analysis

模型因子	AIC值	偏差解释率/%	R^2
Depth	177.058	23.50	0.222
SBS	201.342	11.00	0.096
SBT	199.252	13.10	0.113
Depth+SBS	170.596	28.70	0.264
Depth+SBT	169.368	29.80	0.272
Depth+SBT+SBS	168.113	31.87	0.285

GWR 模型筛选过程如表 2 所示。通过比较各个 GWR 模型的 AIC 值和决定系数, Depth+SBT 模型的 AIC 值最小, 为 126.296, R^2 值最大, 为 0.449, 最优带宽为 0.113。最优 GWR 模型的表达式为

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^t \beta_k(u_i, v_i)x_{ki}(\text{Depth}) + \sum_{k=1}^t \beta_k(u_i, v_i)x_{ki}(\text{SBT}) + \varepsilon_i. \quad (6)$$

3.2 多鳞鱈空间分布

山东近海 A 区、B 区、C 区共调查了 162 个站点,

表 2 多鳞鱈空间分布的环境影响因子的 GWR 模型筛选过程

Table 2 Forward-selection procedure of GWR model for environmental influencing factors on spatial distribution of *Sillago sihama*

模型	AIC值	R^2	带宽
Depth	126.478	0.446	0.099
SBS	139.011	0.387	0.154
SBT	135.911	0.405	0.104
Depth+SBS	130.291	0.426	0.167
Depth+SBT	126.296	0.449	0.113
SBS+ SBT	137.733	0.398	0.163
Depth+SBS+SBT	129.613	0.436	0.167

其中 A 区、B 区、C 区分别捕获到多鳞鳕的站位有 41 个、10 个、11 个。多鳞鳕主要分布在山东近岸海域, 在 122.5°E 以东的远岸海域未捕获到多鳞鳕。大

部分站位的多鳞鳕相对资源量在 0~50 g/h, 在 150~215 g/h 的站位有 2 个, 分布在 A 区, 即 37.5°~38.5°N, 119°~120.5°E 的海域范围内(图 2)。

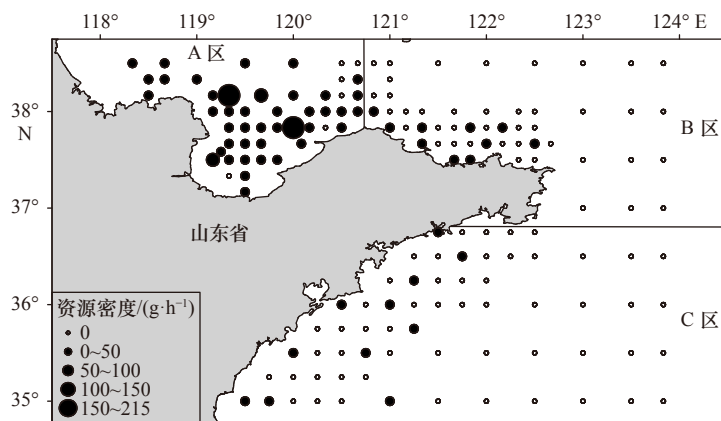


图 2 山东近海多鳞鳕的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of *Sillago sihama* in the Shandong coastal waters

3.3 GAM 和 GWR 模型对比

利用 AIC 和 R^2 指标对模型表现性能进行评估。结果显示, 由相同解释变量构建的 GWR 模型与 GAM 在不同解释变量组合中模型性能表现不同(表 1, 表 2)。此外, 分别对比具有相同解释变量组合的 GWR 模型和 GAM 的 AIC 和 R^2 指标发现, GWR 模型具有较低的 AIC 值和较高的 R^2 值。可见, GWR 模型比 GAM 具有更优的拟合效果。

GAM 结果显示, 在底层海水盐度、水深和底层海

水温度 3 个环境因子中, 水深对多鳞鳕相对资源量的影响最大, 其偏差解释率达到 23.50%(表 1)。多鳞鳕相对资源量随着深度的增加而降低(图 3)。底层海水温度对多鳞鳕相对资源量的影响小于水深的影响, 随着底层海水温度的升高, 多鳞鳕相对资源量整体呈现先增加后降低的趋势, 在 19.8°C 左右相对资源量达到顶峰。而底层海水盐度的偏差解释率最低, 为 11.00%(表 1)。随着底层海水盐度的升高, 多鳞鳕相对资源量逐渐升高(图 3)。

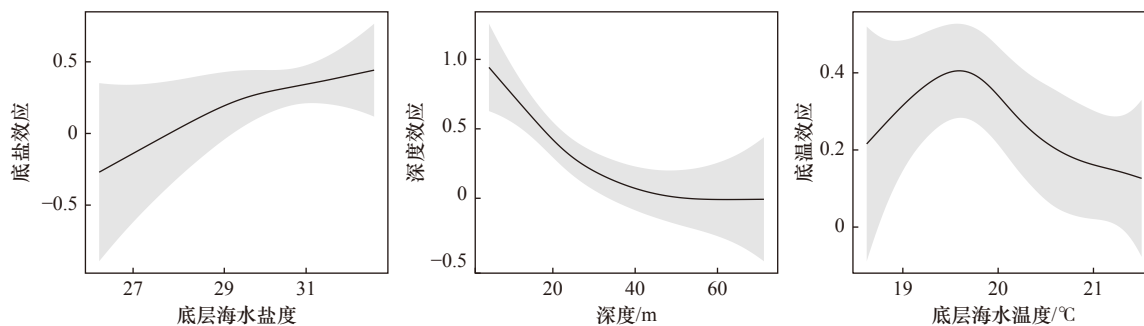


图 3 GAM 中不同环境因子对山东近海多鳞鳕相对资源量的影响

Fig. 3 Effects of different environmental variables on relative abundance of *Sillago sihama* in the Shandong coastal waters in GAM

GWR 模型分析结果显示, 多鳞鳕的相对资源量与水深、底层海水温度这两个环境因子之间的关系在空间上是非平稳的。从各参数上看, 底层海水温度和水深对多鳞鳕相对资源量在空间上变化影响显著($p < 0.01$)。截距局部回归系数的变化范围为 -13.722~7.805, 67.2% 为负影响, 32.8% 为正影响。底层海水温度局部回归系数的范围为 -0.349~0.755, 对多鳞鳕相

对资源量主要是正影响, 正相关占 68.8%, 负相关占 31.2%。水深局部回归系数的范围是 -0.028~0.029, 负相关占 76.6%, 正相关占 23.4%, 对多鳞鳕相对资源量的负影响多于正影响(表 3)。

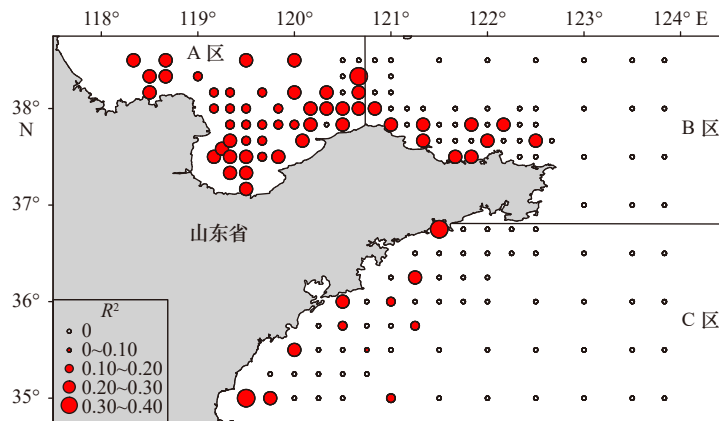
根据 GWR 模型 R^2 可以看出最优 GWR 模型在近岸水域的表现更佳, 近岸水域水深和底层海水温度的决定系数值达到 0.30~0.40, 远岸决定系数值大部分

表3 最优 GWR 模型局部参数估计汇总统计

Table 3 Summary statistics of the local parameter estimates for the optimal GWR model

变量	最小值	1/4分位数	中位数	3/4分位数	最大值	p	正相关/%	负相关/%
截距	-13.722	-3.901	1.265	1.814	7.805	<0.01	32.8	67.2
底层海水温度	-0.349	-0.066	-0.039	0.249	0.755	<0.01	68.8	31.2
水深	-0.028	-0.015	-0.009	-0.005	0.029	<0.01	23.4	76.6

为 0.10~0.20, 少部分为 0~0.10(图 4)。总体上, 近岸海域的模型拟合度较高, 远岸模型拟合度较低。

图4 最优 GWR 模型决定系数(R^2)的空间分布Fig. 4 Spatial distribution of R^2 values in the optimal GWR model

为了进一步分析 GWR 模型中水深和底层海水温度对多鳞鲢空间分布的影响, 分别绘制了水深和底层海水温度的局部回归系数空间分布(图 5)。由图可以看出, 局部回归系数随空间位置改变而改变, 同一因子对不同地点多鳞鲢相对资源量的影响程度不同。在调查区域中, 水深主要与多鳞鲢相对资源量形成负相关关系, 底层海水温度主要与多鳞鲢相对资源量呈正相关关系。对比水深和底层海水温度的局部回归系数看出, 水深和底层海水温度局部回归系数高值区均在 A 区, 并且底层海水温度局部影响程度高于水深, 最高可达 0.90, 而水深局部回归系数最高仅为 0.04。

4 讨论

4.1 多鳞鲢的空间分布

本研究中发现多鳞鲢聚集区域虽然存在空间上的变化, 但集中分布于近岸海域, 这与以往的研究相一致^[24-25]。值得注意的是, 多鳞鲢主要分布在 35°~38.5°N, 122.5°E 以西的近岸海域, 这可能与多鳞鲢的栖息习性有关。有调查研究发现, 山东海域近岸底质类型主要为砂泥和砂砾, 该特点与多鳞鲢喜栖息底质类型相一致^[2, 26-27]。此外, 山东近岸海域具备水深较

浅、营养盐丰富和饵料充足等优势, 可以为多鳞鲢的生长提供有利的条件^[26, 28]。夏季是多鳞鲢繁殖期, 产卵后开始分散索饵, 之后随着温度降低逐渐向南洄游且迁移至较深水域^[25, 29]。可见, 多鳞鲢的洄游习性对其相对资源量分布的时空变化也有影响。

多鳞鲢相对资源量较大的站位多分布在 37.5°~38.5°N, 119°~120.5°E 范围内, 其原因可能是莱州湾海岸线较长且黄河、小清河等 10 余条入海河流带来了丰富的营养盐, 提高了该海域的初级生产力^[30]。此外, 多鳞鲢喜食底栖生物, 主要摄食多毛类^[24]。结合史书杰^[26]对渤海底栖生物丰度和分布的研究, 本研究发现多鳞鲢相对资源量高值区与底栖生物(其中多毛类丰度最大)资源分布的高值区重叠。可见, 莱州湾可以为多鳞鲢提供较佳的摄食环境。

4.2 环境因子对多鳞鲢空间分布的影响

GAM 和 GWR 模型结果显示, 山东近海多鳞鲢分布主要受到水深、底层海水温度这两个环境因子的影响。底层海水盐度与多鳞鲢资源分布的相关性较低, 这可能与多鳞鲢属于广盐性鱼类有关。沿岸、红树林、河口、沙洲等盐度变化较大海区均有多鳞鲢分布, 其原因可能是在高低盐度变化交界的海域, 其适宜盐度梯度有利于刺激多鳞鲢成鱼的性腺成熟^[31-32]。

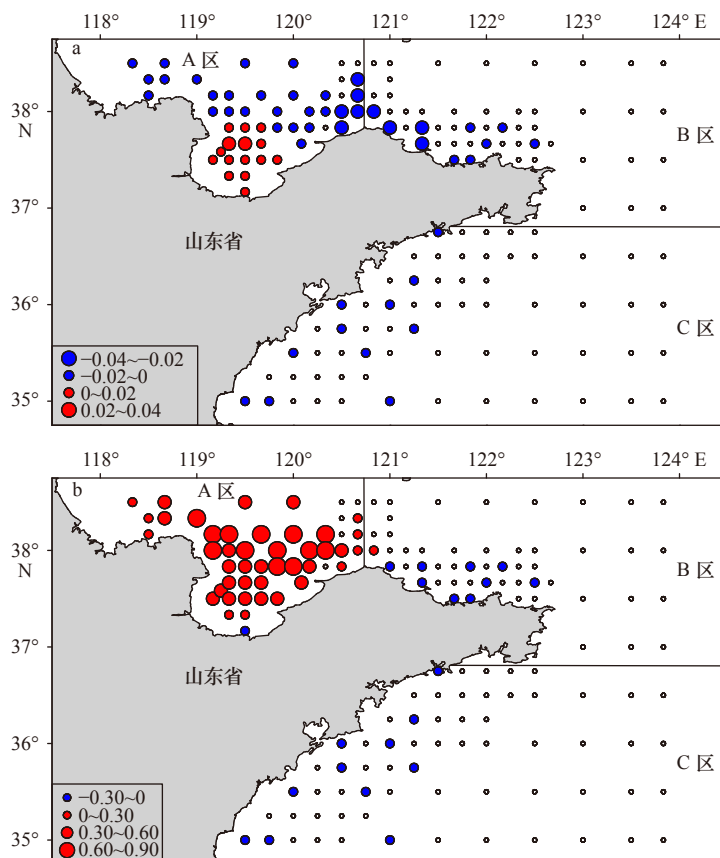


图 5 GWR 模型中水深(a)、底层海水温度(b)局部回归系数值的空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of regression coefficient values for depth (a) and sea bottom temperature (b) in the GWR model

空心圆表示未捕获到多鳞鳕站位; 蓝色实心圆表示与环境变量呈负相关关系; 红色实心圆表示与环境变量呈正相关关系

Small open circles indicate absence of *Sillago sihama*; blue filled circles indicate a negative correlation with the environmental variables; red filled circles indicate a positive correlation with the environmental variables

GAM 结果显示, 水深与山东近海多鳞鳕资源分布的相关性最高, 且随着水深的增加, 多鳞鳕相对资源量呈现降低的趋势。多鳞鳕群体主要分布在 0~60 m 海域^[4, 33]。黄海水深 10~30 m 处水温变化较大且其初级生产力高值区主要集中于中上层水域^[8, 34]。可见, 水深差异会直接影响温度、海洋初级生产力等其他因素直接或间接对鱼类的空间分布造成影响。GWR 模型结果也显示, 多鳞鳕相对资源量与水深呈显著负相关关系。莱州湾(A 区)大部分水深在 10 m 以内, 最大水深为 18 m, 而黄海海域中部(B 区、C 区)水深在 30~70 m 上下, 由西向东逐渐加深^[35]。总之, 莱州湾水深小于黄海中部, 更有利于多鳞鳕栖息。

底层海水温度与秋季山东近海多鳞鳕资源分布的相关性也较高。GWR 模型结果显示, 莱州湾多鳞鳕分布与底层海水温度主要呈现正相关关系, 而在黄海中部(B 区、C 区)主要呈现负相关关系, 这表明多鳞鳕分布与底层海水温度存在空间非平稳性关系。

GAM 根据所有调查数据得出的结论在某些区域不适用的原因可能是由于区域间的底层海水温度差别较大, 也有可能在某些区域底层海水温度不是影响多鳞鳕分布的主要影响因子^[12]。多鳞鳕属于暖水性底层鱼类, 秋季 B 区和 C 区北部受到黄海冷水团的影响, 使其周围海域温度降低, 致使多鳞鳕呈零星分布^[28, 36]。

4.3 模型分析

本研究比较分析了 GAM 和 GWR 模型在拟合多鳞鳕相对资源量与环境因子关系方面的效果。研究表明, GAM 的表现劣于 GWR 模型。值得注意的是, 两个模型的最优模型的解释变量组成并不一致, 如最优 GWR 模型中缺少底层海水盐度这一解释变量。可见, 模型的解释变量组合对 GAM 和 GWR 模型的拟合效果很重要。GAM 使用平滑函数来拟合非线性关系时, 容易过度拟合^[27], 而 GWR 模型是基于线性相关的, 过度拟合风险较小。此外, GAM 通常用于分析响应变量与解释变量间的非线性关系, 得出全局统一

规律,在处理复杂数据方面具有灵活方便的特点^[12]。正如本研究中 GAM 的结果可以直观地分析出适宜水深和温度范围。但在某些情况下,变量之间的关系不是通用的,而是取决于位置^[37]。故 GAM 在处理类似水深等可能存在空间非平稳性的变量时,不能全面准确反映自身的变异规律和可能的响应机制。

对比本研究中 GAM 和 GWR 模型结果,可以看出 GWR 模型更有利于反映出空间上变量间复杂的关系,考虑空间关系的局部特征^[38]。它能够根据不同的带宽在不同的观测点纳入不同的近邻点进行数据分析得出各解释变量与响应变量关系的局部回归系数,侧重于阐释空间异质性及其规律性特征,这是传统分析方法难以实现的^[39]。同时,GWR 模型除考虑响应变量与各解释变量在局部范围内的特定关系外,还能考虑到该关系在全局尺度上的变化,有利于增强参数估计值对空间变化的灵敏性^[22]。可见,GWR 模型在

处理空间非平稳性数据时具有巨大的优越性。此外,生态数据并不都符合正态分布和线性关系的假设,GWR 模型代表使用相对较新的工具来研究空间非平稳性,在渔业数据空间动态分析中表现出了发展潜力^[15]。

综上所述,本研究比较了 GAM 和 GWR 模型对山东近海多鳞鱈资源分布的拟合效果,当物种分布与环境变量存在空间非平稳性时,建议使用 GWR 模型对物种分布进行研究,但在实际应用中,还应根据数据可获得性和实验目的不同选择合适的模型。此外,本研究中多鳞鱈主要分布于莱州湾,其相对资源量与水深、底层海水温度呈非线性关系和存在空间异质性。进一步的研究,还可以从食物网角度分析不同物种间相互作用对多鳞鱈分布的影响,进而根据山东近海多鳞鱈的分布特征和生物学特征规划保护区,这对多鳞鱈的资源管理、保护以及可持续利用具有重要意义。

参考文献:

- [1] Qiu Bixun, Fang Shaobin, Ikhwannuddin M, et al. Genome survey and development of polymorphic microsatellite loci for *Sillago sihama* based on Illumina sequencing technology[J]. *Molecular Biology Reports*, 2020, 47(4): 3011–3017.
- [2] Muchlis N, Prihatiningsih, Restiangsih Y H. Biological characteristics of silver sillago (*Sillago sihama* Forskål) in Bombana Water, South East Sulawesi[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 674: 012010.
- [3] 王军,林民君.罗源湾多鳞鱈的食性[J].福建水产,1993(2): 25–27, 33.
Wang Jun, Lin Minjun. Feeding of *Sillago sihama* in Luoyuan Bay[J]. *Fujian Fisheries*, 1993(2): 25–27, 33.
- [4] Baset A, Liu Qun, Liao Baochao, et al. Growth and mortality of *Sillago sihama* (Forskål) from Karachi Coast, Pakistan[J]. *Asian Journal of Research in Zoology*, 2020, 3(1): 42–52.
- [5] 万瑞景.多鳞鱈早期发育形态[J].海洋水产研究,1996,17(1): 35–41.
Wan Ruijing. Morphology of early development of *Sillago sihama* (Forskål)[J]. *Marine Fisheries Research*, 1996, 17(1): 35–41.
- [6] Lee C S, Hu F, Hirano R. Salinity tolerance of fertilized eggs and larval survival in the fish *Sillago sihama*[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1981, 4: 169–174.
- [7] 朱承之,张云雷,赛可,等.生物和非生物因子对秋季海州湾长蛇鲭栖息地适宜性的影响[J].海洋学报,2020,42(6): 44–51.
Zhu Chengzhi, Zhang Yunlei, Sai ke, et al. Impacts of biotic and abiotic factors on the habitat suitability of *Saurida elongata* during autumn in the Haizhou Bay, China[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(6): 44–51.
- [8] 李迎冬,张崇良,纪毓鹏,等.山东半岛南部海域小黄鱼时空分布及其与环境因子的关系[J].中国水产科学,2021,28(4): 442–450.
Li Yingdong, Zhang Chongliang, Ji Yupeng, et al. Spatio-temporal distribution of *Larimichthys polyactis* in southern waters off the Shandong Peninsula and its relationship with environmental factors[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(4): 442–450.
- [9] 朱文斌,朱海晨,张亚洲,等.浙江沿岸日本鳀幼鱼数量分布及其与环境因子的关系[J].中国水产科学,2021,28(9): 1175–1183.
Zhu Wenbin, Zhu Haichen, Zhang Yazhou, et al. Quantitative distribution of juvenile *Engraulis japonicus* and the relationship with environmental factors along the Zhejiang coast[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(9): 1175–1183.
- [10] Ciannelli L, Fauchald P, Chan K S, et al. Spatial fisheries ecology: recent progress and future prospects[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 71(3/4): 223–236.
- [11] Liu Changdong, Wan Rong, Jiao Yan, et al. Exploring non-stationary and scale-dependent relationships between walleye (*Sander vitreus*) distribution and habitat variables in Lake Erie[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2017, 68(2): 270–281.
- [12] 贾明秀,黄六一,褚建伟,等.基于GAM和GWR模型分析环境因子对南极磷虾资源分布的非线性和非静态性影响[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2019,49(8): 19–26.
Jia Mingxiu, Huang Liuyi, Chu Jianwei, et al. Studies on the nonlinear and spatial nonstationary effects of environmental factors on the distribution of Antarctic krill (*Euphausia superba*)[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(8): 19–26.
- [13] 杨逍遥,王建军,李国栋,等.基于GWR模型的共享单车空间分布影响因素分析[J].交通运输研究,2021,7(1): 81–94.
Yang Xiaoyao, Wang Jianjun, Li Guodong, et al. Factors impacting spatial distribution of bike sharing based on GWR model[J]. *Transport Research*, 2021, 7(1): 81–94.

- [14] 丁亚鹏, 张俊华, 刘玉寒, 等. 基于GWR模型的伊河流域土壤有机碳空间分布特征及影响因素分析[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4876–4885.
Ding Yapeng, Zhang Junhua, Li Yuhan, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in Yihe River Basin based on GWR model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12): 4876–4885.
- [15] Windle M J S, Rose G A, Devillers R, et al. Exploring spatial non-stationarity of fisheries survey data using geographically weighted regression (GWR): an example from the Northwest Atlantic[J]. ICES Journal of Marine Science, 2010, 67(1): 145–154.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6–2007, 海洋调查规范第6部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.6–2007, Specifications for oceanographic survey—Part 6: Marine biological survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [17] Wisz M S, Pottier J, Kissling W D, et al. The role of biotic interactions in shaping distributions and realised assemblages of species: implications for species distribution modelling[J]. Biological Reviews, 2013, 88(1): 15–30.
- [18] Kabacoff R I. R in Action: Data Analysis and Graphics with R[M]. 2nd ed. Shelter Island: Manning Publications Co., 2015.
- [19] Guisan A, Edwards T C Jr, Hastie T. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene[J]. Ecological Modelling, 2002, 157(2/3): 89–100.
- [20] Wood S N. Generalized Additive Models: an Introduction with R[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [21] Gollini I, Lu Binbin, Charlton M, et al. GWmodel: an R package for exploring spatial heterogeneity using geographically weighted models[J]. Journal of Statistical Software, 2015, 63(17): 1–50.
- [22] Fotheringham A S, Brunsdon C, Charlton M. Geographically Weighted Regression: the Analysis of Spatially Varying Relationships[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2002.
- [23] Strawderman R L. Reviewed Work: Model Selection and Inference: A Practical Information-theoretic Approach[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2002: 181.
- [24] 杜涛, 黄洋. 多鳞鱠生物学特性及室内养殖试验[J]. 水产养殖, 2009, 30(3): 1–3.
Du Tao, Huang Yang. Biological characteristics and indoor multiplication experiment of *Sillago sihama* Forskål[J]. Journal of Aquaculture, 2009, 30(3): 1–3.
- [25] 陈大刚. 黄渤海渔业生态学[M]. 北京: 海洋出版社. 1991.
Cheng Dagang. Fishery Ecology in the Yellow Sea and Bohai Sea [M]. Beijing: China Ocean Press. 1991.
- [26] 史书杰. 渤海大型底栖动物生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Shi Shujie. The ecological study of macrobenthos in the Bohai Sea, China[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [27] 李明坤, 徐宾铎, 薛莹, 等. 山东南部近海口虾蛄空间分布特征及其季节变化[J]. 水产学报, 2019, 43(8): 1749–1758.
Li Mingkun, Xu Binduo, Xue Ying, et al. Spatial distribution characteristics and seasonal variation of *Oratosquilla oratoria* in the southern coastal waters of Shandong Province[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(8): 1749–1758.
- [28] 牟秀霞, 李明坤, 尹洁, 等. 山东半岛东南部海域星康吉鳗资源密度时空分布及其与环境因子之间关系[J]. 水产学报, 2019, 43(8): 1759–1767.
Mu Xiuxia, Li Mingkun, Yin Jie, et al. Relationship between spatio-temporal distribution of *Conger myriaster* and the environment factors in the southeast waters of Shandong Peninsula[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(8): 1759–1767.
- [29] 薛泰强. 鱧科几种鱼类的形态学及遗传学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
Xue Taiqiang. Study on morphology and genetics of some Sillaginidae species[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [30] 高彦洁. 莱州湾海域鱼卵仔稚鱼群落结构初步研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
Gao Yanjie. Studies on community structure of ichthyoplankton in Laizhou Bay[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [31] 周银环, 黄海立, 杜涛, 等. 多鳞鱧幼鱼盐度适应性研究[J]. 渔业研究, 2017, 39(1): 22–26.
Zhou Yinhuan, Huang Haili, Du Tao, et al. Study on adaptability of juvenile of *Sillago sihama* to salinity[J]. Journal of Fisheries Research, 2017, 39(1): 22–26.
- [32] 杨艳艳, 朱明明, 徐炳庆, 等. 山东半岛南部近岸海域鱼卵、仔稚鱼群落结构与环境因子相关性[J]. 生态环境学报, 2021, 30(5): 995–1004.
Yang Yanyan, Zhu Mingming, Xu Bingqing, et al. Community structure of ichthyoplankton and its relationship with environmental factors in coastal waters of southern Shandong Peninsula[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(5): 995–1004.
- [33] 卢振彬, 陈骁, 杜建国. 闽南—台湾浅滩渔场多鳞鱧生长、死亡参数及种群动态[J]. 海洋水产研究, 2008, 29(5): 47–53.
Lu Zhenbin, Chen Xiao, Du Jianguo. The population dynamics and parameter of growth and mortality of *Sillago sihama* in the Minnan-Taiwan fishing grounds[J]. Marine Fisheries Research, 2008, 29(5): 47–53.
- [34] 文斐. 黄东海春、夏季分粒级叶绿素 a 及初级生产力研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2012.
Wen Fei. Study on the size fractionated chlorophyll a and primary productivity in spring and summer in the Yellow Sea and East China Sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [35] 李进道. 莱州湾海洋渔业现状[J]. 海洋湖沼通报, 1994(3): 83–87.

- Li Jindao. Present situation of ocean fisheries in Laizhou Bay[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1994(3): 83–87.
- [36] 于非, 张志欣, 刁新源, 等. 黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析[J]. 海洋学报, 2006, 28(5): 26–34.
Yu Fei, Zhang Zhixin, Diao Xinyuan, et al. Analysis of evolution of the Huanghai Sea cold water mass and its relationship with adjacent water masses[J]. Haiyang Xuebao, 2006, 28(5): 26–34.
- [37] Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity[J]. Geographical Analysis, 1996, 28(4): 281–298.
- [38] Cullen D W, Guida V. Use of geographically weighted regression to investigate spatial non-stationary environmental effects on the distributions of black sea bass (*Centropristis striata*) and scup (*Stenotomus chrysops*) in the Mid-Atlantic Bight, USA[J]. Fisheries Research, 2021, 234: 105795.
- [39] 范巧, 郭爱君. 地理加权回归模型方法与研究新进展[J]. 数量经济研究, 2021, 12(2): 134–150.
Fan Qiao, Guo Aijun. Research progress on geographical weighted regression models: a perspective of literature reviews[J]. The Journal of Quantitative Economics, 2021, 12(2): 134–150.

Effect of environmental factors on fish distribution based on GAM and GWR model : A case study of *Sillago sihama* in the Shandong coastal waters

Jian Ying^{1,3}, Zhang Yunlei^{1,3}, Song Yehui^{1,3}, Zhang Chongliang^{1,3}, Ji Yupeng^{1,3}, Ren Yiping^{1,2,3}

(1. Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. Field Observation and Research Station of Haizhou Bay Fishery Ecosystem, Ministry of Education, Qingdao 266003, China)

Abstract: *Sillago sihama* is an important fishery species in China and plays an important role in the marine ecosystem of the Yellow Sea. Species distribution models can be used to predict its distribution by establishing the relationships between its abundance and environmental factors. However, due to high mobility of the marine animals, the relationship between their distribution and environmental factors is often nonlinear and variable with spatial locations. Based on data collected from bottom trawl survey in the Shandong coastal waters in autumn of 2016, both generalized additive model (GAM) and geographically weighted regression (GWR) model were used to analyze nonlinear and spatial nonstationary relationships between distribution of the species and environmental factors, and results from the two models were compared. Results from the GAM indicated that the main environmental factors were depth, sea bottom temperature and salinity, and depth had the largest deviance explained (23.50%). GWR model results showed that there were spatial non-stationary relationships between distribution of the species and depth and sea bottom temperature. GWR model results indicated a negative correlation between depth and biomass of the species, and a positive correlation between sea bottom temperature and biomass of species. Regarding performance of the models, GWR model showed advantages over GAM in identifying influencing factors and predicting distribution, and GWR model was recommended for use in similar applications.

Key words: *Sillago sihama*; geographically weighted regression model; generalized additive model; spatial nonstationarity; spatial distribution