

DOI: 10.12264/JFSC2024-0203

浙江近海三疣梭子蟹空间分布特征及其与环境因子的关系

李向乾^{1,2}, 蒋日进², 单晓鸾³, 李振华², 赵芃^{1,2}, 郝辉擘^{1,2}, 李齐群^{1,2}, 周永东²

1. 浙江海洋大学海洋与渔业研究所, 浙江 舟山 316021;

2. 浙江省海洋水产研究所, 农业农村部重点渔场渔业资源科学观测实验站, 浙江省海洋渔业资源可持续利用技术研究重点实验室, 浙江 舟山 316021;

3. 山东省乳山市海洋经济发展中心, 山东 乳山 264500

摘要: 为探究浙江近海三疣梭子蟹空间分布特征及其影响因素, 根据 2020—2022 年 4 月(春季)和 11 月(秋季)浙江近海底拖网渔业资源调查数据, 利用全局莫兰指数(global Moran's I)、热点分析(Getis-Ord G_i^*)和地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型分析三疣梭子蟹资源的空間自相关性及其与环境因子影响的空間异质性。全局自相关分析结果表明, 春季空間自相关性从小到大依次为 2020 年($P>0.1$)、2022 年($P<0.01$)、2021 年($P<0.01$); 秋季空間自相关性从小到大依次为 2022 年($P<0.05$)、2021 年($P<0.01$)、2020 年($P<0.01$); 2021 和 2022 年均表现为春季三疣梭子蟹空間聚集程度高于秋季, 而 2020 年空間聚集程度为春季低于秋季。局部自相关表明, 春季和秋季三疣梭子蟹热点区位置分布存在相似性, 即春秋三疣梭子蟹热点区分布存在规律, 春季三疣梭子蟹主要聚集在舟山海域西北部, 而秋季则聚集在舟山海域东北部。GWR 模型表明不同季节的环境因子对三疣梭子蟹资源分布具有空間非平稳效应, 春季各环境因子对三疣梭子蟹资源分布影响的空間异质性程度由大到小依次为底层海水溶解氧(SBD)>底层海水温度(SBT)>底层海水盐度(SBS), 秋季空間异质性程度由大到小依次为 SBT>SBD>SBS。结论认为, 三疣梭子蟹的空間自相关性存在一定的年际变化和季节规律, 环境因子对三疣梭子蟹资源分布影响存在明显空間异质性。

关键词: 三疣梭子蟹; 空間自相关; 地理加权回归模型; 空間分布

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)11-1325-11

三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)隶属甲壳纲(Crustacea)、十足目(Decapoda)、梭子蟹科(Portunidae)、梭子蟹属(*Portunus*), 广泛分布于我国近海, 是浙江省主要渔业捕捞对象^[1]。自 19 世纪 80 年代浙江省三疣梭子蟹产量逐年增高, 最高达 20 万 t, 此后产量维持在 15 万 t 左右^[2]。相关研究表明东海三疣梭子蟹面临过度捕捞情况, 资源状况不容乐观^[3]。为保护和持续利用三疣梭子蟹资源, 1983—2017 年间浙江省实施多项渔业管理政策, 包括伏季休渔、增殖放流以及浙北渔场

梭子蟹限额捕捞试点等^[4]。这些政策的开展为保护三疣梭子蟹资源提供了有效途径, 而准确了解三疣梭子蟹资源分布和识别主控环境因子, 对精细化渔业管理有重要意义。

三疣梭子蟹作为重要的底栖经济物种, 其资源分布受多种环境因子共同影响。目前国内外关于三疣梭子蟹研究主要集中于池塘养殖^[5]、疾病防控^[6]、增殖放流^[7]、分子生物学^[8]等方面。国外学者对三疣梭子蟹的相关研究较少。Kang 等^[9]利用室内养殖实验和海域水质调查发现底层溶氧量

收稿日期: 2024-06-26; 修订日期: 2024-07-28.

基金项目: 东海重要渔业资源生产过程与驱动机制项目(2023YFD2401901); 长江口及其邻近海域水生生物资源调查项目(HYS-CZ-202408); 浙江近海重要经济种产卵场调查与评价(HYS-CZ-202416).

作者简介: 李向乾(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源. E-mail: a1255182310@163.com

通信作者: 蒋日进, 高级工程师, 研究方向为渔业资源生态学. E-mail: jiangridge@163.com

和硫化氢是影响广岛湾幼蟹死亡的原因。在国内,张孝民等^[10]发现底层水温、底层盐度和水深对三疣梭子蟹资源分布影响较大,并表明水深通过改变其他环境因子间接影响三疣梭子蟹分布;吴强等^[11]利用 Pearson 相关分析研究了莱州湾三疣梭子蟹空间分布及其影响因素。空间异质性是指地理位置变化导致变量间关系或结构变化^[12]。目前对三疣梭子蟹资源的研究往往忽略空间异质性,而海洋生态系统复杂,不同区域环境因子对鱼类资源分布影响强度存在明显差异^[13]。本研究利用全局莫兰指数(global Moran's I)、热点分析(Getis-Ord G_i^*)和地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型,解析浙江近海三疣梭子蟹的空间分布规律,旨在了解三疣梭子蟹资源分布和环境因子对其分布的局部效应,以为后续渔业管理和保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据来源于 2020—2022 年春季(4 月)和秋季(11 月)在浙江近岸海域进行的底拖网渔业资源调查(27°N~31°N, 121°E~122°E),共设立 83 个站位(图 1)。调查网具网口周长 25 m,囊网网目尺寸 3.0 cm,拖速 2 kn,每个站位拖网时间为 30 min。同时采用 CTD 水质仪记录各站位底层海水盐度(SBS)、底层海水溶氧量(SBD)和底层海水温度(SBT)。渔业调查与样品生物学测定均按照《海洋渔业资源调查规范》(SC/T 9403—2012)的有关规定进行^[14]。网获生物量依据拖网时间 1 h,船速 3 kn 进行标准化,得到三疣梭子蟹相对生物量(kg/h)。

1.2 数据分析

1.2.1 全局莫兰指数 全局莫兰指数可反映全部空间区域内临近单元变量间空间依赖性^[15]。本研究通过全局莫兰指数分析三疣梭子蟹整体空间分布特征,其计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (i \neq j) \quad (1)$$

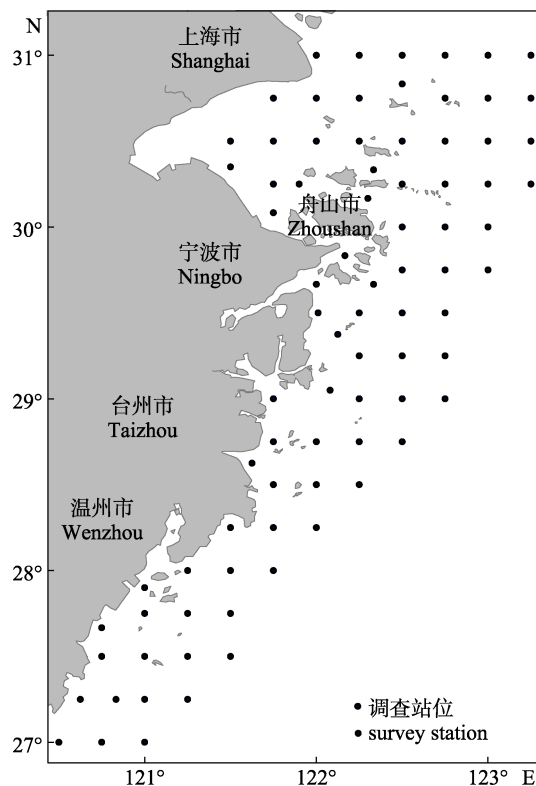


图 1 浙江近海渔业资源调查站位
Fig. 1 Stations of fishery resources in survey
Zhejiang coastal waters

式中, I 为全局莫兰指数; n 为渔业调查站位总数; x_i 和 x_j 分别为站位 i 和 j 的相对生物量; W_{ij} 为空间权重变量,即站位 i 和 j 的空间关系,若站位 i 和 j 为邻近的空间位置时, $W_{ij}=1$,反之 $W_{ij}=0$; $\bar{x}$ 为该年全部站位相对生物量的平均值。

I 值的取值范围为 $[-1,1]$,若 $I>0$,表示生物在空间上呈现聚集趋势,反之 $I<0$,表现为离散趋势。 I 值的绝对值越大,空间相关性越高, $I=0$ 时,表示生物在空间中随机分布。除 I 值外,在实际计算中会返回表示种群在空间中聚集程度的 Z 得分和空间中随机分布的概率的 P 。 Z 得分越大,表示种群在空间中聚集程度越高, P 越高,表示空间中随机分布概率越小。

1.2.2 Getis-Ord G_i^* 指数 Getis-Ord G_i^* 指数可通过获得具有统计学意义的热点(冷点)。统计学意义的热点(冷点)表示三疣梭子蟹在局部空间中发生聚集或离散的位置,其不仅要求某一要素值为高值(低值),周围要素也要为高值(低值)^[16]。计算公式^[17]:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n W_{ij}}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{x})^2} \cdot \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n (W_{ij})^2 - \left(\sum_{j=1}^n W_{ij}\right)^2}{n-1}}} \quad (2)$$

式中, x_j 、 $\bar{x}$ 和 W_{ij} 的意义同式(1)。Getis-Ord G_i^* 指数值包括具有统计意义的 Z 值和 P 。 Z 值绝对值越大且 P 值越小, 则群体在该站位存在空间上的聚集或离散程度越高。 Z 值和 P 按照一定范围划分为热点和冷点(表 1)。

表 1 冷热点取值范围
Tab. 1 Range of cold and hot spot values

Z 得分 Z-score	P	冷/热点 cold/hot spots
<-2.58	<0.01	冷点 cold point
-2.58<Z<-1.96	<0.05	次冷点 secondary cold spot
-1.96<Z<-1.65	<0.1	边缘冷点 edge cold spot
-1.65<Z<1.65		过渡点 transition point
1.65<Z<1.96	<0.1	边缘热点 edge hot spot
1.96<Z<2.58	<0.05	次热点 secondary hot spot
>2.58	<0.01	热点 hot spot

1.2.3 地理加权回归(GWR)模型 GWR 模型是一种局部回归模型, 根据各环境因子的回归系数探索空间关系异质性。利用回归系数正负判断环境因子对三疣梭子蟹分布是否为正影响; 回归系数大小表示影响程度高低, 越接近 0 表示影响越小; 回归系数值域表示环境因子的空间异质性程度大小。GWR 模型运行过程中最重要是确定带宽和权重函数, 由于本研究自变量存在较多“0”值,

因此本研究采用 Gaussian 函数和赤池信息准则(AIC)进行计算和选择最优带宽。使用 GWR 模型的前提条件是保证各环境因子间无高度共线性。因此本研究通过方差膨胀因子(VIF)检验各环境因子间共线性, 底层温度、盐度和溶解氧均 $VIF<4$, 并且对各环境因子进行 Z-score 标准变换本, 探究环境因子对三疣梭子蟹资源分布影响的空间异质性。GWR 模型计算公式^[18]:

$$y = \beta_0(U_i, V_i) + \beta_1(U_i, V_i) \times SBT + \beta_2(U_i, V_i) \times SBD + \beta_3(U_i, V_i) \times SBD + \varepsilon_i \quad (3)$$

式中, β_i ($i=0, 1, 2, 3$)表示回归系数, (U_i, V_i) 表示第 i 个站位的经纬度, ε_i 表示第 i 个站位的模型随机误差。

Global Moran’s I 指数、Getis-Ord G_i^* 指数使用 ArcMap10.8 软件计算, GWR 模型使用 GWR4.0 软件计算, 获得的结果使用 ArcMap 软件的反距离权重法绘制为面状分布图。

2 结果与分析

2.1 数据分布与全局自相关分析

2020—2022 年春秋季偏度均大于 0, 表明三疣梭子蟹资源密度分布为右偏态; 峰度大于 3, 属于高狭峰, 说明三疣梭子蟹资源密度分布以低密度区域为主, 高密度区域较少(表 2)。其中 2021 年春秋季偏度和峰度最大, 表明该年份三疣梭子蟹资源密度分布右偏态较显著且高密度区域较少, 以低密度区为主。其次除 2020 年, 2021 年和 2022 年春季偏度和峰度均小于秋季, 表明秋季三疣梭子蟹资源密度分布右偏态更显著; 以低密度区为主。

表 2 2020—2022 年浙江近海春秋季三疣梭子蟹资源密度统计参数和全局空间自相关
Tab. 2 Statistical parameters and global spatial autocorrelation of *Portunus trituberculatus* density in spring and autumn from 2020 to 2022 in Zhejiang coastal waters

时间 time	相对生物量/(kg/h) relative biomass			偏度 skewness	峰度 kurtosis	Moran’s I	Z 得分 Z score	P
	最大值 max	最小值 min	平均值 mean					
2020 年春季 spring 2020	14.37	0	1.25	3.77	15.46	0.13	1.52	>0.1
2020 年秋季 autumn 2020	16.88	0	2.08	2.90	9.86	0.28	3.14	<0.01
2021 年春季 spring 2021	16.30	0	0.76	5.96	40.46	0.27	4.48	<0.01
2021 年秋季 autumn 2021	252.00	0.4	15.50	6.26	46.36	0.22	3.84	<0.01
2022 年春季 spring 2022	22.70	0	2.25	3.54	16.15	0.26	3.31	<0.01
2022 年秋季 autumn 2022	44.87	0	2.91	5.44	35.63	0.16	2.02	<0.05

2020—2022 年春秋季全局莫兰值均大于 0, 三疣梭子蟹在浙江近海的空间自相关性为正相关。除 2020 年春季, 三疣梭子蟹均呈现聚集分布模式。从季节变化来看, 除 2020 年, 2021、2022 年春季三疣梭子蟹空间分布相关性和聚集程度高于秋季。从年际变化来看, 春季空间自相关性从小到大依次为 2020 年、2022 年、2021 年。其中 2021 年和 2022 年春季呈极显著聚集分布状态(Z 得分 >2.58 , $P<0.01$)。秋季空间自相关性从小到大依次为 2022 年、2021 年、2020 年。其中 2020 年和 2021 年秋季呈极显著聚集分布状态(Z 得分 >2.58 , $P<0.01$), 2022 年秋季呈显著聚集分布状态

(Z 得分 >1.96 , $P<0.05$)。这表明 2020—2022 年春季和秋季三疣梭子蟹分布特征均存在明显的年际间差异和季节差异。

2.2 局部空间自相关分析

三疣梭子蟹在浙江近海分布有明显季节差异和年际间差异(图 2)。2020—2021 年, 春季热点区域集中在舟山海域西北部, 而秋季热点区域主要分布于舟山海域东北部。具体来看, 2021 年春季热点区域最大, 2020—2022 年春季热点区面积呈先增大后减小的趋势。2020 年春季热点区域在舟山海域西北部和温州海域南部, 在岱山海域附近存在一个边缘热点; 2021 年和 2022 年春季仅在舟

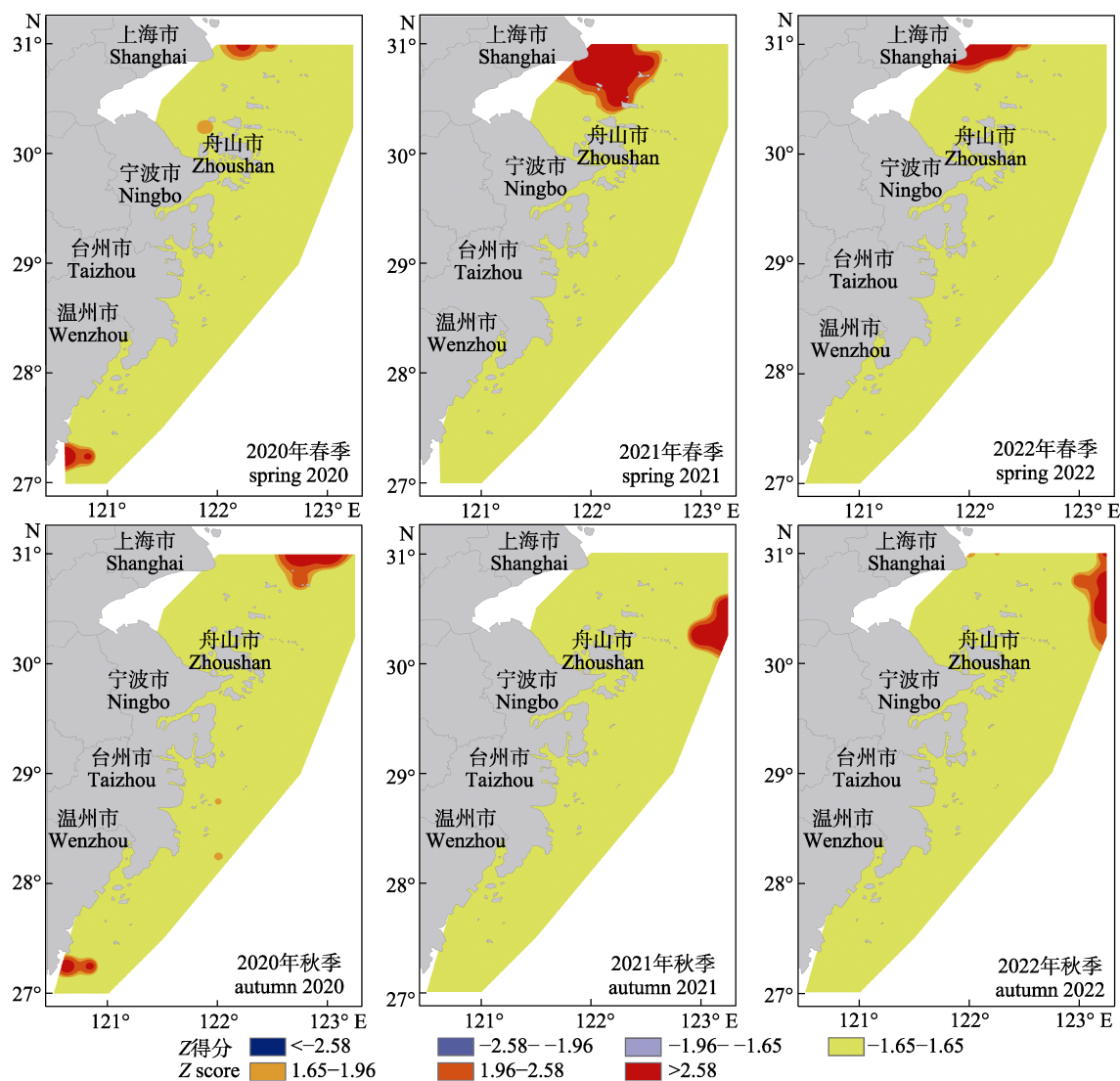


图 2 2020—2022 年浙江南部近海春秋季三疣梭子蟹资源热点分布特征

Fig. 2 Hot spot distribution characteristics of *Portunus trituberculatus* in spring and autumn from 2020 to 2022 in Zhejiang coastal waters

山海域西北部存在热点区域。秋季热点区域面积从小到大依次为 2022 年、2020 年、2021 年。2020 年秋季热点区在舟山马鞍列岛附近海域和温州近岸海域, 在东矾列岛和大陈岛附近海域分别存在 1 个边缘热点; 2021 年秋季热点区在舟山中街山列岛和浪岗山列岛附近海域; 2022 年秋季热点区在舟山海域东部 $123^{\circ}\text{E}\sim 123.25^{\circ}\text{E}$, $30^{\circ}\text{N}\sim 31^{\circ}\text{N}$, 在舟山西北部存在两个边缘热点。

2.3 资源分布与环境因子的关系

如图 3 所示, GWR 结果表明, 春季 SBD 对三疣梭子蟹资源分布影响的空间异质性程度最大, 正值主要集中在舟山和台州附近海域, 其中 SBD

在舟山海域附近对三疣梭子蟹资源分布的影响程度最高。SBT 和 SBS 空间异质性程度次之, SBT 回归系数多为正值, 影响范围包括舟山海域和温州中南部海域, 在舟山海域附近对三疣梭子蟹资源分布正影响最高。SBS 在舟山海域附近负影响程度最高, 仅在台州南部海域和温州海域存在正影响。

秋季 SBT 对三疣梭子蟹资源分布影响的空间异质性程度最大, 以负影响为主, 其在舟山海域东部和北部对三疣梭子蟹资源分布正影响最高, 在温州南部海域负影响程度最高。SBS 空间异质性程度次之, 回归系数大都为正值, 在温州南部海域正影响程度最高, 负影响范围仅在舟山海域

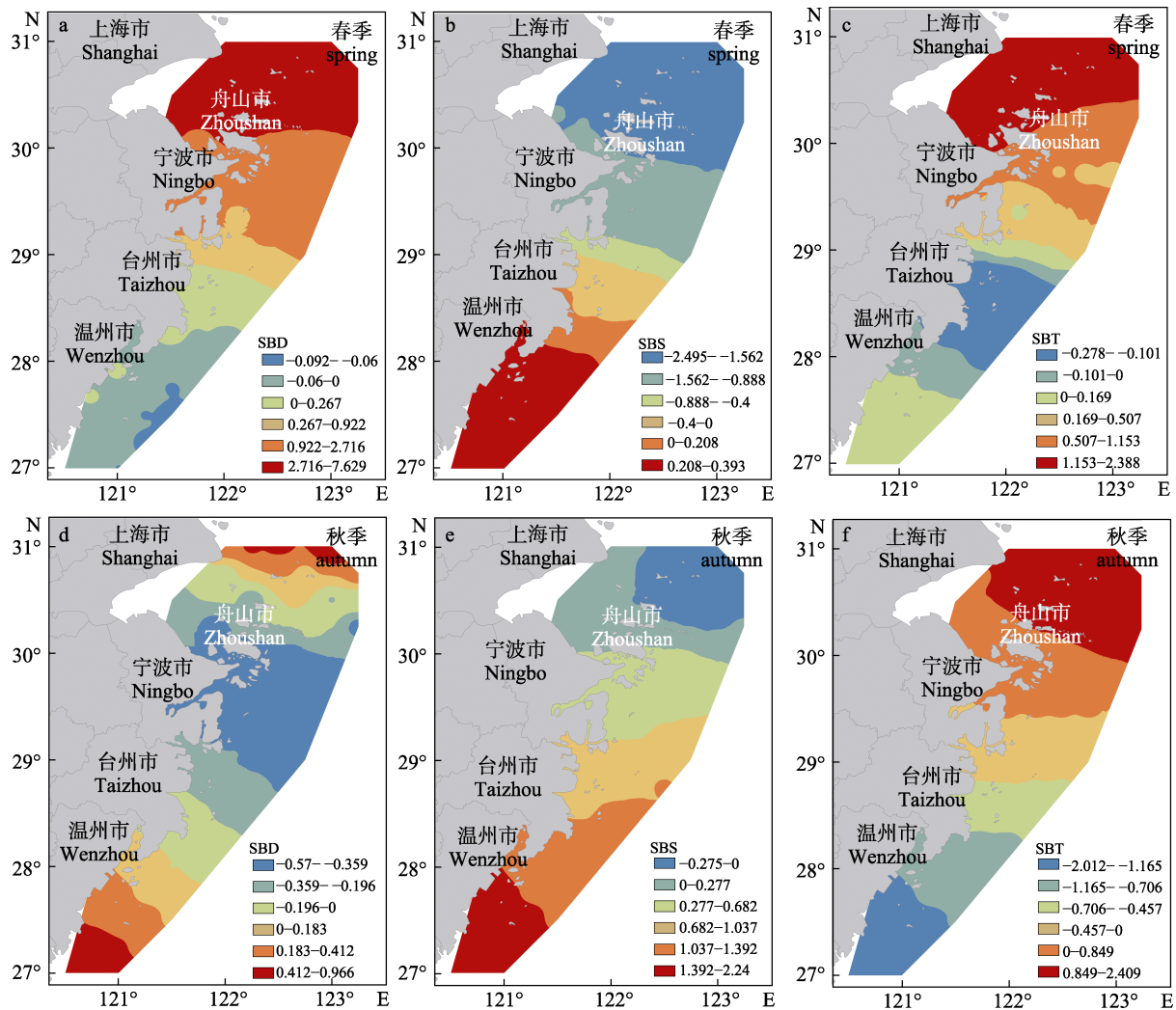


图 3 浙江南部近海春秋季节底层海水溶氧量(SBD)、底层海水盐度(SBS)和底层海水温度(SBT)对三疣梭子蟹资源分布的影响的效应系数分布

Fig. 3 Distribution of the effect coefficients of sea bottom dissolved oxygen (SBD), sea bottom salinity (SBS) and sea bottom temperature (SBT) on the distribution of *Portunus trituberculatus* in spring and autumn in Zhejiang coastal waters

东北部海域。SBD 空间异质性程度最低,负影响范围较广,仅在温州南部海域和舟山北部海域存在正影响。

GWR 模型局部拟合度(图 4)在不同研究区域具有显著差异,春季拟合度整体高于秋季。春季

表现出由南向北拟合度逐渐增高的趋势,其中在舟山海域 121.5°E~123.25°E, 30°N~31°N 附近最高。秋季拟合度较差,在舟山海域 28.9°N~30°N, 122.1°E~123°E 和 27°N~27.25°N, 120.5°E~121°E 附近拟合度最高。

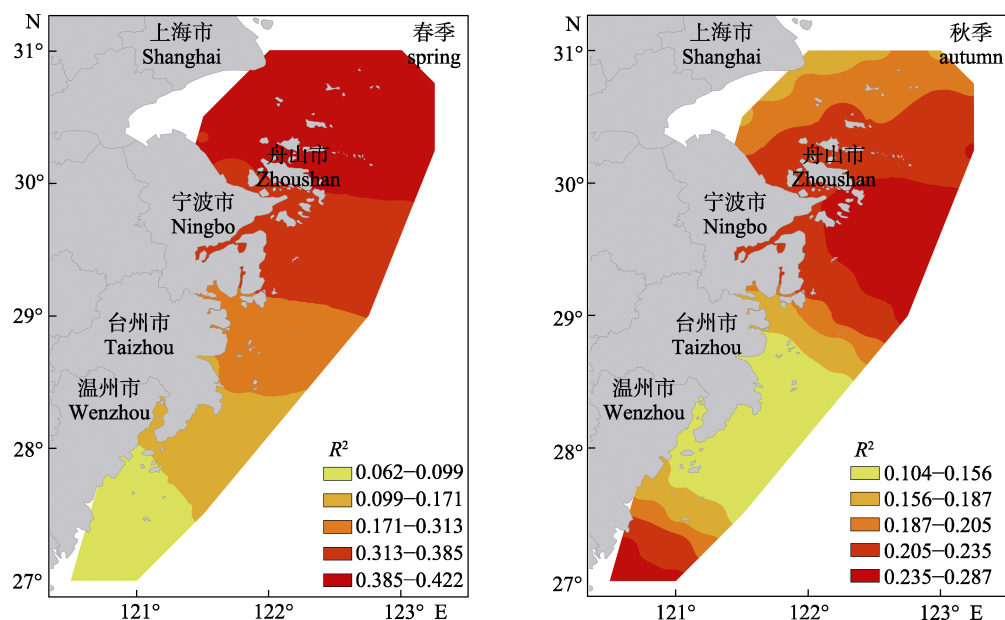


图 4 浙江南部近海春秋三疣梭子蟹资源分布与环境因子关系拟合程度(R^2)

Fig. 4 Degree of fitness (R^2) of the relationships between the density distribution of *Portunus trituberculatus* and environmental factors in spring and autumn of Zhejiang coastal waters

3 讨论

3.1 三疣梭子蟹聚集性分析

本研究发现三疣梭子蟹存在明显正相关的空间自相关现象($I>0$),表明三疣梭子蟹在春秋两季均处于聚集状态,但春秋两季三疣梭子蟹聚集程度存在差异。研究表明繁殖是导致生物聚集性增加的原因之一,该现象在口虾蛄和茎柔鱼均有发现^[15,19]。2021 年和 2022 年均表现为春季聚集程度高于秋季,推测可能与三疣梭子蟹生活习性有关。三疣梭子蟹繁殖时间为 4—10 月,大量三疣梭子蟹聚集在浙江近岸浅海产卵,故存在高聚集性^[20]。秋季聚集性低可能是此时为三疣梭子蟹索饵期,分散摄食,空间聚集性降低。2000 年浙江省开始实施三疣梭子蟹增殖放流,其放流数量呈逐年增加状态^[21]。研究发现三疣梭子蟹增殖放流数量显著影响其资源量^[22]。增殖放流使秋季三疣梭子蟹资

源量增加,导致种内竞争加剧,栖息范围扩展到次优地区,聚集性降低^[23-24]。此外,苏奋振等^[25]认为人类活动和环境等因素破坏鱼类应有的空间结构和空间自相关格局。因此渔业捕捞和环境变化可能是三疣梭子蟹聚集性降低的原因之一。

2020—2022 年春季和秋季分别表现出一定的相似性,春季热点区在舟山西北部附近海域,秋季热点区在舟山东部附近海域,这与在浙江海域调查结果基本一致^[26-27]。春秋两季热点区均位于长江口附近海域,长江冲淡水为长江口附近海域带来丰富的营养盐使得该海域饵料丰富,吸引需要发育的三疣梭子蟹来此摄食。此外,三疣梭子蟹摄食和幼蟹发育均需要较高的温度和溶解氧。春季台湾暖流延伸到长江口海域,使该海域水温升高,同时长江径流量增大,水流交换频繁,溶氧量升高,使得该海域环境适合三疣梭子蟹生长发育^[28]。秋季近岸浅水区温度不适合三疣梭子蟹生存,

短距离洄游至 10~30 m 的海域^[4]。秋季热点区离岸距离远, 水深适合三疣梭子蟹生长, 同时受台湾暖流影响温度适宜, 故成为三疣梭子蟹聚集区域。

3.2 资源分布与环境因子关系

三疣梭子蟹属洄游性底栖生物, 其资源量、分布与海洋环境息息相关。本研究 GWR 模型结果显示 SBT、SBD 和 SBS 3 种环境因子对三疣梭子蟹资源分布的影响均存在显著的时空差异性。春季 SBD 对三疣梭子蟹资源分布影响的时空异质性程度最大, 秋季最小。溶氧量是限制生物分布的直接因素之一, 水中溶氧量不足会导致水体中硝酸盐、亚硝酸盐等物质在水体中堆积, 三疣梭子蟹活力降低, 摄食率下降, 蜕壳率降低^[29]。春季是三疣梭子蟹亲体产卵和幼蟹发育时间, 组织器官分化、完善以及细胞代谢加快使三疣梭子蟹耗氧率高, 因此春季溶解氧升高有利于三疣梭子蟹在热点区聚集产卵和育幼^[30]。秋季三疣梭子蟹以储存能量为主, 肌肉和脂肪等耗氧低, 虽然耗氧量与体重呈正相关, 但是耗氧率随体重增加而减少, 因此底层海水溶解氧变化对三疣梭子蟹影响较小^[31]。研究结果发现春秋季节热点区 SBS 均对三疣梭子蟹资源分布为负影响, 这与栗小东等^[32]结果基本一致。三疣梭子蟹对盐度的需求随发育阶段改变, 产卵和幼体生长阶段偏好低盐环境, 越冬和索饵阶段喜好高盐环境^[33]。杨泽琴等^[34]认为低盐胁迫下, 三疣梭子蟹幼体为维持渗透压, 代谢旺盛, 存活率和蜕壳率高。因此盐度适当降低可能对三疣梭子蟹在热点区聚集产卵和幼蟹发育有利。秋季为三疣梭子蟹索饵育肥时期, 此时热点区受台湾暖流影响, 盐度平均值(33.795)高于三疣梭子蟹等渗点盐度(28.06), 导致三疣梭子蟹需要更多能量维持渗透压, 对三疣梭子蟹生长和性腺发育不利^[35]。

本研究发现, SBT 在秋季空间异质性程度最大, 春季空间异质性相对较小。有研究发现温度变化对三疣梭子蟹能量代谢、酶活性等存在影响, 并发现温度处于 16 °C 和 30 °C 时三疣梭子蟹处于胁迫状态^[36]。春秋季节浙江北部海域水温相对较低, 因此适当升温, 有利于三疣梭子蟹聚集发育摄

食。Iftikar 等^[37]等发现线粒体氧化磷酸化途径在高温条件下受到抑制, 因此可能是温度过高对三疣梭子蟹生长发育起抑制作用, 这可能是导致春秋季节浙南海域 SBT 与三疣梭子蟹资源分布负相关的原因。因此三疣梭子蟹在热点区聚集可能是由于环境因子直接或间接影响三疣梭子蟹能量利用导致。

3.3 模型方法

广义线性模型(GLM)和广义可加模型(GAM)等采用全局回归方法探究资源量与环境因子关系, 该方法研究前提是环境因子对资源量在整个空间影响程度一致, 这掩盖了环境影响程度的局部差异性^[38]。而 GWR 模型通过在每个空间位置建立局部回归方程有效解决空间异质性问题^[39]。在自然生态系统中, 生物与环境的关系存在动态变化, 生物—环境关系的局部回归方法更能准确反映生物与环境关系^[40]。关于物种分布与环境关系的空间异质性研究逐渐增加, 黄鲈^[41]、虾虎鱼^[42]、口虾蛄^[43]、黑海鲈和大西洋鲷^[39]等鱼类均发现环境因子对资源分布存在明显空间异质性。三疣梭子蟹对环境较为敏感, 其资源分布与栖息环境的交互作用复杂。浙江海域环境复杂, 地表河流、台湾暖流等使海域不同区域环境因子存在一定差异。因此复杂的海洋环境和较大的研究范围使环境因子对三疣梭子蟹分布存在明显空间异质性。尽管使用 GWR 模型预测海洋物种的空间分布具有许多优点, 但由于 GWR 模型的局部回归特性, 其不适宜研究数据量较少的数据集。在本研究中, 构建三疣梭子蟹资源分布与环境因子的关系是基于渔业资源调查所得数据, 调查站位数量有限, 加之外界环境或一些其他不可抗力因素的影响, 调查中也会存在数据缺失的情况。Windle 等^[44]建议 GWR 模型和全局回归模型一起使用, 从而更好地了解在大尺度海洋中物种分布与环境因子关系。赵杨等^[45]通过 GWR 模型与栖息地指数结合, 发现拟合结构明显优于基于全局 HSI 模型。有研究表明 MaxEnt 模型在数据有限的条件下能提供准确的模拟结果^[46]。因此在后续研究中, 将尝试 GWR 模型与 GLM 模型、基于贝叶斯最大熵

模型等相结合,克服数据量较少、零值较多的问题,提高计算精度。同时利用遥感技术获得环境数据,以期更加充分准确了解三疣梭子蟹资源分布与不同环境因子关系。

参考文献:

- [1] Hu Y B, Xu M J, Wang T Z, et al. Analyses of yield fluctuation of *Portunus trituberculatus* and potential influencing factors in Zhejiang province[J]. Marine Sciences, 2019, 43(2): 69-73. [胡茨斌, 徐美佳, 王天姿, 等. 浙江省三疣梭子蟹产量波动及潜在影响因素分析[J]. 海洋科学, 2019, 43(2): 69-73.]
- [2] Wang D, Wu F X. China Fishery Statistical Yearbook. 2023[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2023.159. [王丹, 吴反修. 中国渔业统计年鉴. 2023[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.159.]
- [3] Yue L T, Wang Y B, Zhang H, et al. Stock assessment using the LBB method for *Portunus trituberculatus* collected from the Yangtze Estuary in China[J]. Applied Sciences, 2020, 11(1): 342.
- [4] Tao Y X, Zhu W B, Zhang H L, et al. Spatial-temporal distribution of *Portunus trituberculatus* resources and its relationship with environmental factors in the coastal waters of north-central Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2023, 42(5): 385-390. [陶迎新, 朱文斌, 张洪亮, 等. 浙江中北部近海三疣梭子蟹资源时空分布特征及其与环境因子的关系[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 385-390.]
- [5] Xie Z L, Jiang X D, Hou W J, et al. Effects of soft diet on ovarian development and nutritional quality of adult female swimming crab *Portunus trituberculatus*[J]. Fisheries Science, 2024, 43(2): 173-188. [解志龙, 姜晓东, 侯文杰, 等. 软颗粒饲料对三疣梭子蟹卵巢发育和营养品质的影响[J]. 水产科学, 2024, 43(2): 173-188.]
- [6] Liu W X, Chen X L, Li M, et al. Epidemic outbreak of *Hematodinium* disease in cultured *Portunus trituberculatus* along Rizhao coast[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2023, 54(5): 1373-1382. [刘炜鑫, 陈晓玲, 李蒙, 等. 日照沿海养殖三疣梭子蟹血卵鞭虫流行病发生过程研究[J]. 海洋与湖沼, 2023, 54(5): 1373-1382.]
- [7] Xu X, Tang W Y, Wang Y B. Releasing capacity of *Portunus trituberculatus* enhancement in Zhoushan fishing ground and Yangtze River estuary fishing ground and their adjacent waters[J]. South China Fisheries Science, 2019, 15(3): 126-132. [徐雪, 唐伟尧, 王迎宾. 舟山渔场及长江口渔场临近海域三疣梭子蟹增殖容量估算[J]. 南方水产科学, 2019, 15(3): 126-132.]
- [8] 张新贵, 何天庆, 叶振江, 等. 基于线粒体 CO I 基因和形态学方法的 3 种梭子蟹科蚤状幼体物种鉴定[J]. 中国水产科学, 2023, 30(2): 218-225. [Zhang X G, He T Q, Ye Z J, et al. Zoea identification of three swimming crabs: *Portunus trituberculatus*, *Charybdis japonica*, and *Charybdis bimaculate* through morphological and mitochondrial CO I gene analyses[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(2): 218-225.]
- [9] Kang J, Matsuda O, Yamamoto T. Effects of low dissolved oxygen and hydrogen sulfide on early developmental stages of blue crab *Portunus trituberculatus* in Hiroshima bay, Japan[J]. Journal of the Faculty of Applied Biological Science-Hiroshima University (Japan), 1993,32(2):61-70.
- [10] Zhang X M, Wang X X, Li S W, et al. Optimization of habitat suitability model for *Portunus trituberculatus* in Laizhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2022, 53(3): 726-734. [张孝民, 王秀霞, 李少文, 等. 基于优化模型的莱州湾三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)栖息地适宜性研究[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(3): 726-734.]
- [11] Wu Q, Wang J, Chen R S, et al. Biological characteristics, temporal-spatial distribution of *Portunus trituberculatus* and relationships between its density and impact factors in Laizhou Bay, Bohai Sea, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(6): 1993-2001. [吴强, 王俊, 陈瑞盛, 等. 莱州湾三疣梭子蟹的生物学特征、时空分布及环境因子的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1993-2001.]
- [12] Liu Y, Wang K L, Xing X Y, et al. On spatial effects in geographical analysis[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(3): 517-531. [刘瑜, 汪珂丽, 邢潇月, 等. 地理分析中的空间效应[J]. 地理学报, 2023, 78(3): 517-531.]
- [13] Liu C D, Wan R, Jiao Y, 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.
- [14] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Technical Specification for Marine Fishery Resources Survey: SC/T 9403—2012[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2013. [中华人民共和国农业部. 海洋渔业资源调查规范: SC/T 9403—2012[S]. 北京: 中国农业出版社, 2013.]
- [15] Li M K, Xu B D, Xue Y, 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. [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.]
- [16] Zhao G Q, Wu Z L, Cui X S, et al. Spatial temporal patterns of chub mackerel fishing ground in the Northwest Pacific

- based on spatial autocorrelation model[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(1): 22-35. [赵国庆, 吴祖立, 崔雪森, 等. 基于空间自相关模型的西北太平洋日本鲭渔场时空变动研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(1): 22-35.]
- [17] Liu Y X, Wang X F, Lü S L, et al. Spatial autocorrelation of *Priacanthus* spp. resources in the northern South China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(8): 1361-1373. [刘禹希, 王学锋, 吕少梁, 等. 南海北部海域大眼鲷空间自相关性[J]. 水产学报, 2021, 45(8): 1361-1373.]
- [18] Bai S Q, Zou X R, Zhang P, et al. Study on spatial heterogeneity effect of environmental factors on distribution of Chilean jack mackerel in Southeast Pacific Ocean[J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(1): 17-24. [白思琦, 邹晓荣, 张鹏, 等. 环境因子对东南太平洋智利竹荚鱼渔场时空分布异质性影响[J]. 南方水产科学, 2021, 17(1): 17-24.]
- [19] Fang X Y, Feng Y J, Chen X J, et al. Spatial heterogeneity of *Dosidicus gigas* in the high sea off Peru from June to September[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2016, 25(2): 271-281. [方学燕, 冯永玖, 陈新军, 等. 6-9 月秘鲁外海茎柔鱼资源的空间异质性研究[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(2): 271-281.]
- [20] Yan W C. Study on the relationship between the catch fluctuation of *Portunus trituberculatus* and the human disturbance and environment factors in Zhejiang fishery[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2019. [颜文超. 浙江渔场三疣梭子蟹渔获量波动与人类干扰和环境因子的关系研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019.]
- [21] Yang C H, Liu Q, Wang Y B. Assessment of the maximum sustainable yield of *Portunus trituberculatus* in the northern areas of the East China Sea under the impact of stock enhancement[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2022, 53(5): 1219-1224. [杨春蕙, 刘琦, 王迎宾. 增殖放流影响下东海北部海域三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)最大可持续产量评估[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(5): 1219-1224.]
- [22] Wang Y B, Ye T, Wang X G, et al. Impact of main factors on the catch of *Portunus trituberculatus* in the northern East China Sea[J]. Pakistan Journal of Zoology, 2016, 49(1): 13-17.
- [23] Zhang M, Wang X H, Cai Y C, et al. Spatial aggregation and dispersion characteristics of *Trichiurus haumela* in the Beibu Gulf, Northern South China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(11): 1647-1658. [张曼, 王雪辉, 蔡研聪, 等. 北部湾带鱼空间聚散变化特征[J]. 中国水产科学, 2022, 29(11): 1647-1658.]
- [24] Niu W Z, Han L, Yu C G, et al. Crab community structure and its relationship with environmental factors in the eastern sea area of Zhoushan Islands[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(2): 29-38. [牛威震, 韩磊, 俞存根, 等. 舟山群岛东侧海域蟹类群落结构及其与环境因子的关系[J]. 海洋学报, 2022, 44(2): 29-38.]
- [25] Su F Z, Zhou C H, Shi W Z, et al. Spatial heterogeneity of demersal fish in East China Sea[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(4): 683-686. [苏奋振, 周成虎, 史文中, 等. 东海区底层及近底层鱼类资源的空间异质性[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 683-686.]
- [26] Zheng X Z, Yu C G, Chen X Q, et al. Species composition and spatio-temporal distribution of crabs in Zhoushan fishing ground and its adjacent areas[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(1): 147-153. [郑献之, 俞存根, 陈小庆, 等. 舟山渔场及邻近海域蟹类种类组成和时空分布[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(1): 147-153.]
- [27] Song H T, Ding Y P, Xu Y J. Distribution and population composition characteristics of *Portunus trituberculatus* in the coastal waters of northern Zhejiang[J]. Marine Science Bulletin, 1989, 8(1): 66-74. [宋海棠, 丁耀平, 许源剑. 浙江近海三疣梭子蟹洄游分布和群体组成特征[J]. 海洋通报, 1989, 8(1): 66-74.]
- [28] Hou W F, Yu C G, Chen X Q. Temperature distribution in Zhoushan fishing ground[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2013, 26(3): 31-34. [侯伟芬, 俞成根, 陈小庆. 舟山渔场的水温分布特征分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2013, 26(3): 31-34.]
- [29] Ding P P, Gao C X, Tian S Q, et al. Crab community structure and its relationship with environment factors in the offshore waters of southern Zhejiang Province[J]. Marine Fisheries, 2019, 41(6): 652-662. [丁朋朋, 高春霞, 田思泉, 等. 浙江南部近海蟹类群落结构及其与环境因子的关系[J]. 海洋渔业, 2019, 41(6): 652-662.]
- [30] Xu J R, Wang C L, Mu C K, et al. Relationship between oxygen consumption and oxygen consumption rate and the body mass of *Portunus trituberculatus* at its early development stages[J]. Journal of Marine Sciences, 2012, 30(1): 102-106. [许金荣, 王春琳, 母昌考, 等. 三疣梭子蟹早期发育阶段的耗氧量、耗氧率与体质量的关系[J]. 海洋学研究, 2012, 30(1): 102-106.]
- [31] Li Z H, Yu Z B, Gao T L, et al. The oxygen consumption, ammonia excretion and asphyxiation point of *Portunus trituberculatus* in different growth periods[J]. Journal of Biology, 2017, 34(5): 57-61. [李朝华, 余作奔, 高天龙, 等. 不同生长期三疣梭子蟹的耗氧率、排氨率和窒息点[J]. 生物学杂志, 2017, 34(5): 57-61.]
- [32] Li X D, Wang J, Yang C H, et al. Spatiotemporal distribution of *Portunus trituberculatus* in the northern East China Sea

- based on two machine learning methods[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2021, 52(5): 1284-1292. [栗小东, 王晶, 杨春蕙, 等. 基于两种机器学习方法分析东海北部海域三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)时空分布[J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(5): 1284-1292.]
- [33] Song H T, Yu C G, Xue L J. Fishery Biology of Economic Shrimp and Crab in the East China Sea[M]. Beijing: Ocean Publishing House, 2012: 228. [宋海棠, 俞存根, 薛利建. 东海经济虾蟹类渔业生物学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 228.]
- [34] Yang Z Q, Lu S K, Wang Y C, et al. Effects of salinity on the molting of juvenile swimming crab (*Portunus trituberculatus*)[J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2016, 29(1): 18-21. [杨泽琴, 卢少坤, 王奕超, 等. 盐度对三疣梭子蟹幼蟹蜕壳的影响[J]. 宁波大学学报(理工版), 2016, 29(1): 18-21.]
- [35] Long X W, Wu R F, Hou W J, et al. Effects of water salinity on the growth, ovarian development, osmoregulation, metabolism and antioxidant capacity of adult female swimming crab (*Portunus trituberculatus*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(8): 1768-1780. [龙晓文, 吴仁福, 侯文杰, 等. 水体盐度对雌性三疣梭子蟹生长、卵巢发育、渗透压调节、代谢和抗氧化能力的影响[J]. 水产学报, 2019, 43(8): 1768-1780.]
- [36] Lu Y L. Basic research about effects of temperature on metabolic physiology of swimming crab *Portunus trituberculatus*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2016. [路允良. 温度对三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)代谢生理特征影响的基础研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2016.]
- [37] Iftikar F I, MacDonald J, Hickey A J R. Thermal limits of portunid crab heart mitochondria: Could more thermo-stable mitochondria advantage invasive species?[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2010, 395(1): 232-239.
- [38] Cai Y C, Sun M S, Xu Y W, et al. Spatial heterogeneity of relationship between distribution of *Uroteuthis chinensis* and marine environment in offshore waters of northern South China Sea[J]. *South China Fisheries Science*, 2023, 19(3): 1-10. [蔡研聪, 孙铭帅, 许友伟, 等. 南海北部近海中国枪乌贼分布与海洋环境关系的空间异质研究[J]. 南方水产科学, 2023, 19(3): 1-10.]
- [39] 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.
- [40] Li Y, Jiao Y, Browder J A. Modeling spatially-varying ecological relationships using geographically weighted generalized linear model: A simulation study based on longline seabird bycatch[J]. *Fisheries Research*, 2016, 181: 14-24.
- [41] Liu C D, Liu J C, Jiao Y, et al. Exploring spatial nonstationary environmental effects on Yellow Perch distribution in Lake Erie[J]. *PeerJ*, 2019, 7: e7350.
- [42] Zhai L, Li Z G, Wan R, et al. Effects of estuarine environmental heterogeneity on the habitat of gobiidae species larvae[J]. *Marine and Coastal Fisheries*, 2023, 15(3): e10241.
- [43] Li M K, Zhang C L, Xu B D, et al. A comparison of GAM and GWR in modelling spatial distribution of Japanese Mantis shrimp (*Oratosquilla oratoria*) in coastal waters[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 244: 106928.
- [44] 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.
- [45] Zhao Y, Zhang X Q, Bian X D. Habitat suitability index of larval Japanese Halfbeak (*Hyporhamphus sajori*) in Bohai Sea based on geographically weighted regression[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 293-299. [赵杨, 张学庆, 卞晓东. 基于地理加权回归的渤海沙氏下鱚鱼仔稚鱼栖息地指数[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 293-299.]
- [46] Liu H C, Zhao N X, Zhuang Y Q, et al. Assessment of habitat suitability for *Naemorhedus griseus* in the Qinling Mountains with MaxEnt model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 4181-4188. [刘红彩, 赵纳勋, 庄钰琪, 等. 基于 MaxEnt 模型的秦岭山地斑羚生境适宜性评价[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 4181-4188.]

Spatial distribution characteristics of *Portunus trituberculatus* in the coastal waters of Zhejiang and their relationships with environmental factors

LI Xiangqian^{1,2}, JIANG Rijin², SHAN Xiaoluan³, LI Zhenhua², ZHAO Peng^{1,2}, HAO Huibo^{1,2}, LI Qiqun^{1,2}, ZHOU Yongdong²

1. Marine and Fisheries Research Institute, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316021, China;

2. Zhejiang Marine Fisheries Research Institute; Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources for Key Fishing Grounds, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Key Laboratory of Sustainable Utilization of Technology Research for Fishery Resources of Zhejiang Province, Zhoushan 316021, China;

3. Rushan Marine Economic Development Center of Shandong Province, Rushan 264500, China

Abstract: *Portunus trituberculatus* is widely distributed in the coastal waters of China and is currently facing high fishing pressure. To protect and sustainably utilize the fishery resources of *P. trituberculatus*, this study was conducted based on survey data from an offshore trawl survey in Zhejiang Province in April (spring) and November (autumn) from 2020 to 2022. The spatial distribution characteristics and the relationship between *Portunus trituberculatus* and marine environment were analyzed using global autocorrelation analysis, hot spot analysis, and the geographical weighted regression (GWR) model. The results showed that the spatial autocorrelation in spring ranked from small to large in the order of 2020, 2022, and 2021, and that in autumn ranked from small to large in the order of 2022, 2021, and 2020. In 2021 and 2022, the spatial aggregation degree of *P. trituberculatus* in spring was higher than that in autumn, whereas that in 2020 was lower than that in autumn. The local autocorrelation showed that the distribution of hot spots in spring and autumn was regular. In spring, *P. trituberculatus* mainly concentrated around the waters near the northwest of the Zhoushan Sea area at coordinates 121.7°–122.5° E, 30.7°–31° N, whereas in autumn, it concentrated around the northeastern part of the Zhoushan Sea area at coordinates 122.5°–123.25° E, 30°–31° N. The GWR model showed that environmental factors had spatial non-stationary effects on resource distribution of *P. trituberculatus* during different seasons. The spatial heterogeneity degree of environmental factors on resource distribution of *P. trituberculatus* spring was in the order of bottom sea dissolved oxygen (SBD)>bottom sea temperature (SBT)>bottom sea salinity (SBS). The spatial heterogeneity in autumn was in the order of SBT>SBD>SBS. This study contributes to understanding the spatial distribution of *P. trituberculatus* in offshore waters of Zhejiang, thereby providing a scientific foundation for the management of fishery resources.

Key words: *Portunus trituberculatus*; spatial autocorrelation; geographically weighted regression model; spatial distribution

Corresponding author: JIANG Rijin. E-mail: jiangridge@163.com