

DOI: 10.12264/JFSC2021-0609

北部湾带鱼空间聚散变化特征

张曼^{1,2,3}, 王雪辉^{1,2,4}, 蔡研聪¹, 杜飞雁¹, 孙典荣¹, 王跃中¹, 王亮根¹, 许柳雄³, 邱永松¹

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300;
2. 农业农村部海洋牧场重点实验室, 国家数字渔业(海洋牧场)创新分中心, 中国水产科学研究院海洋牧场技术重点实验室, 广东省海洋休闲渔业工程技术研究中心, 广东 广州 510300;
3. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
4. 三亚热带水产研究院, 海南 三亚 572000

摘要: 本研究利用 2006—2018 年北部湾底拖网渔业资源调查的带鱼(*Trichiurus haumela*)资源密度数据, 通过标准差椭圆(standard deviational ellipse, SDE)分析带鱼空间分布格局, 利用广义可加模型(generalized additive model, GAM)研究带鱼资源密度与环境因子叶绿素 a (Chl-a)、海表水温异常值、水深、离岸距离、经度和纬度的关系, 为北部湾带鱼资源的可持续利用和保护提供科技支撑。研究结果显示, 北部湾带鱼资源密度分布呈逐年集聚现象, 渔场分布方向受海底地貌影响呈现西南-东北向, 夏季资源密度重心呈西南-东北向移动, 冬季资源密度重心呈南-北向移动, 且冬季带鱼资源密度重心较夏季更偏东北向; 春、秋季为带鱼主要的产卵季节, 其资源密度重心位于夏、冬季带鱼渔场中部。研究表明北部湾带鱼资源密度的逐年下降是导致其空间分布逐渐集聚的主要原因。Chl-a 对带鱼资源密度和空间分布均有影响, 水深、经度和海表水温异常值对带鱼资源密度有影响, 但对其空间分布无直接影响。

关键词: 带鱼; 空间分布; 环境因子; 标准差椭圆; 广义可加模型; 北部湾

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)11-1647-12

北部湾位于南海西北部(105°40'E~110°10'E、17°00'N~21°45'N), 东接雷州半岛、琼州海峡和海南岛, 北依广西, 西靠越南, 是一个天然半封闭海湾, 其气候良好、地理位置得天独厚, 是我国驰名的传统渔场^[1-2]。带鱼(*Trichiurus haumela*)是南海主要经济鱼类之一, 2019 年南海带鱼产量为 27.7×10^4 t, 占南海三省区(广东、广西、海南)海洋鱼类总产量的 9.2%^[3]。目前有较多学者针对环境与带鱼性成熟概率^[4]、渔获量^[5]、空间结构和生活群落研究^[6]等方面展开研究, 本研究则通过广

义可加模型(generalized additive model, GAM)探究环境与带鱼资源密度关系, 进一步探讨环境对带鱼空间分布的影响。

生物在空间上并非随机分布, 而是呈现空间格局, 鱼类种群也不例外。了解空间分布模式驱动因子, 既是基本的生态问题, 也是对鱼类进行合理管理的必要条件^[7]。研究表明, 环境和种群丰度均对鱼群空间分布有影响^[7-9], 但两者对鱼群分布的影响在不同时期表现不同, 如 Swain 等^[10]对大西洋鳕(*Gadus morhua*)的分布进行研究, 认

收稿日期: 2022-01-20; 修订日期: 2022-02-11.

基金项目: 海南省自然科学基金项目(422MS156); 国家科技基础资源调查专项(2017FY201405, 2018FY100105); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2019HY-JC0203, 2019GH02); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(2021SD14); 中越北部湾共同渔区渔业资源联合调查项目。

作者简介: 张曼(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业生物学与资源评估. E-mail: 2721327717@qq.com

通信作者: 王雪辉, 博士, 副研究员, 研究方向为渔业资源调查与评估、渔业生物学等. E-mail: wxhscs@163.com

为鳕的分布在觅食季受丰度的影响,在越冬季受温度的影响,分别体现了密度制约和非密度制约对鱼群分布的影响。Fisher 等^[11]则着重对鱼群丰度和分布变化展开研究,认为两者具有显著的正相关关系。

标准差椭圆(standard deviational ellipse, SDE)是衡量空间要素分布特征的统计方法,Perzia 等^[12]和蔡研聪等^[13]利用标准差椭圆方法分析地中海剑鱼(*Xiphias gladius*)以及南海北部苏门答腊金线鱼(*Nemipterus mesoprion*)资源空间分布的格局变化。带鱼是我国重要的经济鱼类,有关中国海域带鱼的研究较多,但主要集中在资源评估、生活史等方面^[14-16],而针对带鱼的集散格局变化特征的认识仍有较大不足。因此,本研究根据 2006—2018 年北部湾带鱼资源密度调查数据,应用空间统计法阐明带鱼空间聚散变化,并结合海洋环境因子和空间因子,分析带鱼数量与空间和环境因子的关系,为该海域带鱼资源的科学管理和持续利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据

1.1.1 调查数据 本研究所用的带鱼资源密度数据取自 2006—2018 年在北部湾开展的 28 个航次底拖网渔业资源调查,资源密度根据扫海面积法估算。2006 年分别在春季(4 月)、夏季(7 月)、秋季(10 月)、冬季(1 月)开展调查;2007—2018 年分别在夏季(7 月)和冬季(1 月)开展调查。使用的调查船为“北渔 60011”底拖网渔船,总吨位 242 t,长 36.8 m,宽 6.8 m,主机功率 441 kW。采样网具为 404 型单船底拖网,其上纲长度为 37.7 m,网口网目尺寸 20 cm,网囊网目尺寸 3.9 cm,网衣长 60.5 m^[17]。调查区域根据 2000 年于北京签订的《中越北部湾渔业合作协定》划定,协定有效日期为 2004 年 6 月 30 日至 2019 年 6 月 30 日^[18-19]。采样站位地图^[20]取自国家地理信息公共服务平台,审图号为 GS(2016)1549,由中华人民共和国自然资源部监制,其黑色线为国界线,蓝色线为省界线(图 1)。

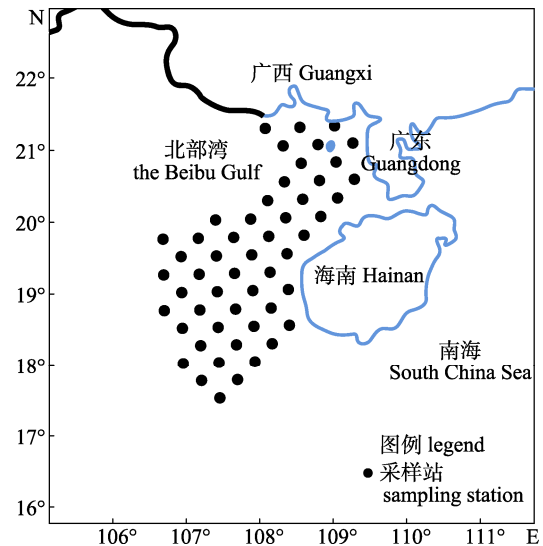


图 1 北部湾底拖网采样站示意图

黑色线为国界线,蓝色线为省界线。

Fig. 1 Sketch map sampling station in the Beibu Gulf
The black line is the national borderline and the blue line is the provincial borderline.

1.1.2 环境数据 叶绿素 a (sea surface chlorophyll-a, Chl-a)、海表水温异常值(sea surface temperature Anomaly, SSTA)均来源于美国国家海洋与大气管理局网站 (<https://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/>),时间范围为 2006—2018 年的 1 月(冬季)和 7 月(夏季),时间分辨率为天,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,经度(longitude)和纬度(latitude)范围分别为 $106^\circ\text{E} \sim 110^\circ\text{E}$, $17^\circ\text{N} \sim 22^\circ\text{N}$ 。水深(depth)数据为采样时的实测值。离岸距离(distance)根据采样站点位置通过软件 ArcGIS10.2 的近邻距离法计算得到。

1.2 方法

1.2.1 标准差椭圆 标准差椭圆(standard deviational ellipse, SDE)是衡量空间要素分布特征的统计方法,通过 ArcGIS 方向分布工具构建,可描述重心趋势、离散和方向趋势等特征,在本研究中可以表示带鱼空间分布的聚集性^[21]。SDE 以研究对象的空间分布的重心作中心;椭圆长轴表示空间要素最大离散方向,短轴表示空间要素最小离散方向。即通过标准差椭圆重心、长短轴的变化来反映渔业资源的空间分布和移动特征。公式如下:

$$\bar{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}; \quad \bar{Y}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

$$\tan\theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \bar{y}_i^2\right) \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \bar{y}_i^2\right)^2 + 4\left(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i \bar{y}_i\right)^2}}{2\sum_{i=1}^n \bar{x}_i \bar{y}_i} \quad (2)$$

$$\sigma_x = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (w_i \bar{x}_i \cos\theta - w_i \bar{y}_i \sin\theta)^2}}{\sum_{i=1}^n w_i^2} \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \bar{x}_i \sin\theta - w_i \bar{y}_i \cos\theta)}{\sum_{i=1}^n w_i^2} \quad (4)$$

式中, (x_i, y_i) 为第 i 个采样点的空间位置坐标; w_i 为权重, 本研究以带鱼渔获量为权重值; n 为总的采样点数量; θ 为转角, 代表研究对象空间分布的主趋势; σ_x 为椭圆长轴长度; σ_y 为椭圆短轴长度; 标准差椭圆面积反映鱼群分布的聚集状况, 即面积越小表明鱼群资源分布越聚集。

1.2.2 因子筛选 因子包括叶绿素 a (Chl-a)、海表水温异常值(SSTA)、纬度(lat)、经度(lon)、水深(depth)、离岸距离(distance)。利用方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)对因子分别进行多重共线性检验, 筛选适合加入模型的因子。VIF ≥ 10 时, 表明变量间存在严重的多重共线性, 则该自变量在建模前予以去除^[22]。

1.2.3 广义可加模型 广义可加模型(generalized additive models, GAM)由广义线性模型(generalized linear model, GLM)和非参数回归方法发展而来。GAM 模型能够处理响应变量与解释变量之间高度非线性关系, 通过平滑样条函数、局部回归平滑函数对变量进行拟合^[23]。GAM 表达式为^[24]:

$$Y = \alpha + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \varepsilon \quad (5)$$

式中, Y 为响应变量, x_i 为解释变量, α 为适合函数的截距, ε 表示残差, $f_i(x_i)$ 表示自变量的任意单变量函数, 为样条平滑函数(spline smoothing)。

本研究旨在阐明空间和环境因子对资源密度的影响, 由于数据具有季节性, 因而将季节作为

变量, 结合本研究实际数据, 构建如下基础模型:

$$\lg(Y) = \text{season} + s(\text{lat}) + s(\text{lon}) + s(\text{depth}) + s(\text{distance}) + s(\text{Chl-a}) + s(\text{SSTA}) + \varepsilon \quad (6)$$

式中, Y 为带鱼的资源密度, s 为样条平滑函数, ε 为模型误差, 其服从高斯分布。

在模型拟合过程中, 利用逐步回归法(stepwise method)通过赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)和广义交叉验证(generalized cross validation, GCV)逐步检验加入因子后模型的拟合程度, AIC 的值越小表明模型拟合效果越佳^[25]。通过卡方检验评估因子的显著性, 根据参考自由度(estimated degrees of freedom, EDF)来确定影响因子与变量之间的关系^[25-26]。本研究模型通过 R4.0.3 软件中的 mgcv 包构建^[24,27]。

2 结果与分析

2.1 带鱼分布的年际变化

利用北部湾带鱼 2006—2018 年 13 年间的资源密度创建标准差椭圆(表 1、表 2 及图 3)。结果显示, 2006—2018 年夏、冬季带鱼标准差椭圆面积整体呈现下降趋势, 表明资源密度呈集聚现象; 渔场方向均呈西南-东北向。夏季资源密度重心呈西南-东北向移动, 冬季除 2009 年外, 其余年份呈南-北向, 且在昌化外海渔场内移动, 其移动范围为 $107^{\circ}20'E \sim 108^{\circ}0'E$, $18^{\circ}20'N \sim 19^{\circ}40'N$ 。椭圆面积与年份有相关性($r = -0.397$, $P = 0.044$), 表明带鱼空间分布呈逐年集聚现象。

2.2 带鱼分布的季节变化

根据表 3 及图 3 可知, 带鱼四季的渔场方向均为西南-东北向, 但冬、春季的带鱼资源密度方向较夏、秋季偏东; 冬、春季的标准差椭圆面积小于夏、秋季, 即冬、春季鱼群的聚集性比夏、秋季强。带鱼冬季资源密度重心较夏季更偏东北向, 春、秋季资源密度重心位于夜莺渔场南部, 在夏、冬季资源密度重心的中部。

2.3 带鱼资源密度和环境的关系到

通过方差膨胀因子(VIF)对选取的 7 个因子进行了多重共线性检验(表 4), VIF 均小于 10。

利用 GAM 模型拟合并预测加入变量后对模型的影响, 得到空间和环境因子对带鱼资源密度

表 1 2006–2018 年夏季北部湾带鱼资源密度的标准差椭圆参数
 Tab. 1 Statistical parameters of standard deviational ellipse (SDE) of *Trichiurus haumela* stock density in summer in the Beibu Gulf

年份 year	重心经度/(°) centerx	重心纬度/(°) centery	长轴/km xstddist	短轴/km ystddist	面积/10 ⁴ km ² area	转角/(°) rotation
2006	107.96	19.60	144.93	313.68	14.28	29.68
2007	108.10	19.40	116.86	276.45	10.15	34.49
2008	108.55	19.91	92.85	239.80	6.99	37.13
2009	107.47	19.15	145.53	268.42	12.27	42.38
2010	108.15	19.66	122.28	243.32	9.35	25.17
2011	107.74	18.49	90.57	231.97	6.60	23.28
2012	107.67	18.96	147.91	303.17	14.09	20.39
2013	108.38	19.79	111.89	296.90	10.43	30.78
2014	108.18	19.38	92.01	275.97	7.98	22.74
2015	108.40	19.70	112.99	293.24	10.41	30.02
2016	107.67	18.18	104.51	162.22	5.33	39.22
2017	107.51	19.32	148.49	223.35	10.42	16.53
2018	107.60	18.62	87.49	215.86	5.93	1.05

Note: Centerx denotes longitudinal center of SDE; centery denotes latitudinal center of SDE; xstddist denotes major axis of SDE; ystddist denotes minor axis of SDE; area denotes the area of SDE; rotation denotes the rotation of SDE.

表 2 2006–2018 冬季北部湾带鱼资源密度的标准差椭圆参数
 Tab. 2 Statistical parameters of standard deviational ellipse (SDE) of *Trichiurus haumela* stock density in winter in the Beibu Gulf

年份 year	重心经度/(°) centerx	重心纬度/(°) centery	长轴/km xstddist	短轴/km ystddist	面积/10 ⁴ km ² area	转角/(°) rotation
2006	107.55	19.18	118.68	256.65	9.57	46.89
2007	107.70	19.09	139.23	300.55	13.15	28.77
2008	107.82	19.19	133.52	310.33	13.02	31.42
2009	108.65	20.00	101.55	362.41	11.56	33.20
2010	107.95	19.46	113.87	354.25	12.67	25.44
2011	107.92	19.08	195.72	286.62	17.62	12.27
2012	107.89	18.64	151.62	265.92	12.67	36.27
2013	107.50	18.69	154.80	219.72	10.69	31.60
2014	107.98	18.82	1942.44	120.18	12.10	24.25
2015	107.55	18.46	111.35	226.92	7.94	6.64
2016	107.63	18.53	109.50	304.97	10.49	23.91
2017	107.74	19.03	150.98	280.97	13.33	31.59
2018	107.96	18.57	151.40	185.20	8.81	27.76

Note: Centerx denotes longitudinal center of SDE; centery denotes latitudinal center of SDE; xstddist denotes major axis of SDE; ystddist denotes minor axis of SDE; area denotes the area of SDE; rotation denotes the rotation of SDE.

的累计偏差(表 5)。根据 AIC 和 GCV 值, 以 lon、depth、Chl-a 和 SSTA 因子构建的 GAM 模型为最优。因子对模型的累计偏差为 16.2%, 调整后的 R^2 为 0.14。

GAM 模型拟合中, 通过逐步回归法筛选 4 个对带鱼资源密度有影响的因子。带鱼资源密度随经度的增加而呈上升趋势, 且置信区间较高($P < 0.001$)

(图 4a)。在水深 20~80 m 之间, 带鱼资源密度随水深的增加而增加, 且置信区间较高($P < 0.001$) (图 4b)。在 0~1 mg/m³ 之间, 带鱼资源密度随叶绿素 a 的增加而增加, 置信区间较高($P = 0.002$) (图 4c)。海表水温异常值在 0~1 °C 间, 带鱼资源密度随海表水温异常值的增加而增加, 置信区间较高($P = 0.004$) (图 4d)。叶绿素 a、水深、经度和海表水温异常值

的 P 值均小于 0.05, 表明带鱼资源密度受叶绿素 a、水深、经度和海表水温异常值的影响。

2.4 带鱼分布与环境的的关系

根据图 2d 和图 5 可知带鱼分布与其资源密度

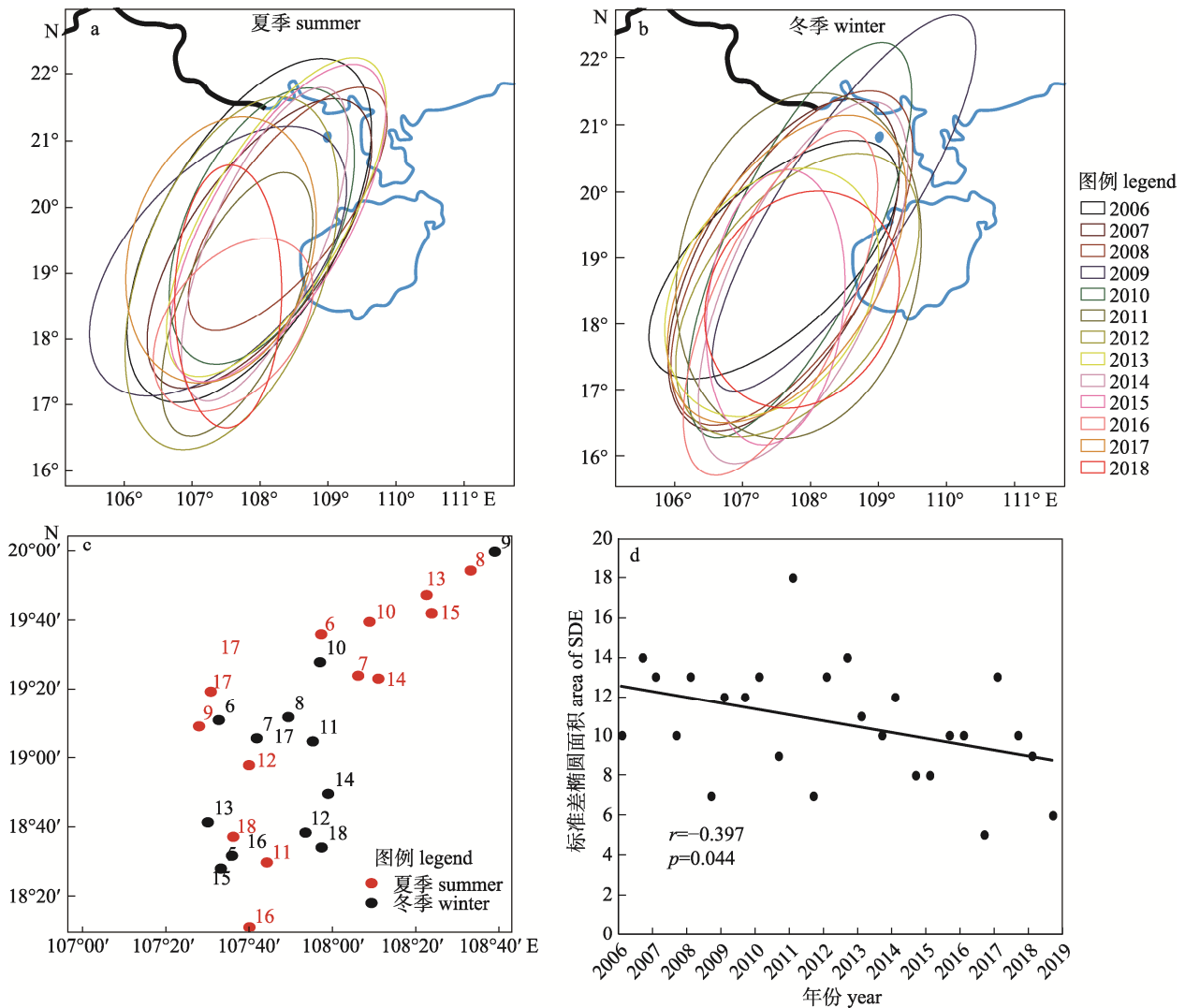


图 2 2006–2018 年北部湾夏冬季带鱼资源密度的标准差椭圆面积及与资源密度重心年际变化
a. 夏季椭圆图; b. 冬季椭圆图; c. 资源密度重心年际变化; d. 夏冬季标准差椭圆年际变化。

Fig. 2 Interannual variation of areas and gravity centers of standard deviational ellipse (SDE) of *Trichiurus haumela* stock density in summer and winter in the Beibu Gulf in 2006–2018

a. the SDE in summer; b. the SDE in winter; c. interannual change of center of gravity of stock density; d. interannual change of the SDE in summer and winter.

表 3 2006 年四季北部湾带鱼资源密度标准差椭圆参数

Tab. 3 Statistical parameters of standard deviational ellipse (SDE) of *Trichiurus haumela* stock density in the Beibu Gulf in the four seasons in 2006

季节 season	重心经度/(°) centerx	重心纬度/(°) centery	长轴/km xstddist	短轴/km ystddist	面积/10 ⁴ km ² area	转角/(°) rotation
春季 spring	107.96	19.41	127.70	269.50	10.81	48.43
夏季 summer	107.96	19.60	144.93	313.68	14.28	29.68
秋季 autumn	107.98	19.39	137.59	328.97	14.22	29.68
冬季 winter	107.55	19.18	118.68	256.65	9.57	46.89

Note: Centerx denotes longitudinal center of SDE; centery denotes latitudinal center of SDE; xstddist denotes major axis of SDE; ystddist denotes minor axis of SDE; area denotes the area of SDE; rotation denotes the rotation of SDE.

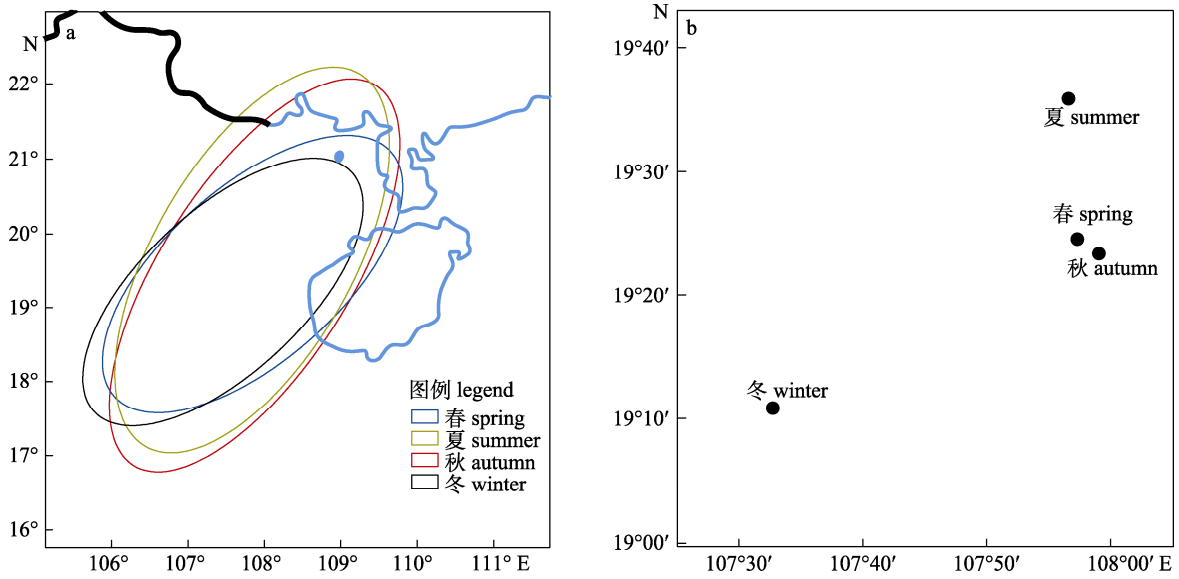


图 3 2006 年北部湾带鱼资源密度标准差椭圆面积与资源密度重心的季节变化

a. 四季椭圆图; b. 资源密度重心季节变化.

Fig. 3 Seasonal variation of standard deviational ellipse areas and gravity centers of *Trichiurus haumela* stock density in the Beibu Gulf in 2006

a. The SDE in four seasons; b. Seasonal changes of the gravity center of stock density.

表 4 基于方差膨胀因子(VIF)的空间和环境因子的多重共线性检验

Tab. 4 Multicollinearity test of spatial and environmental factors based on variance inflation factor (VIF)

因子 factor	VIF
纬度 lat	4.11
经度 lon	2.23
水深 depth	4.38
离岸距离 distance	1.69
叶绿素 a Chl-a	2.75
海水水温异常值 SSTA	2.10

相关, 通过线性拟合可移除捕捞效应所引起的带鱼分布变化趋势。移除趋势后的带鱼分布(残差)与叶绿素 a 有相关性($r=0.400, P=0.043$), 与经度($r=0.295, P=0.143$)、水深($r=-0.302, P=0.134$)和海

表水温异常值($r=-0.279, P=0.167$)无相关性(图 6)。表明叶绿素 a 对带鱼的空间分布格局有影响, 其他环境因子对其无影响。

3 讨论

3.1 北部湾带鱼的空间分布

北部湾带鱼四季的资源密度分布方向均为西南-东北向(图 2a 和图 2b)。且北部湾斑鳍白姑鱼(*Pennahia pawak*)与北部湾二长棘犁齿鲷(*Evynnis cardinalis*)的渔场方向分布均为西南-东北向^[28-29]。西南-东北向的分布格局是由北部湾的海底地貌所造成。北部湾是一个三面陆地环绕的半封闭海湾, 受周围陆缘围限控制, 海底向湾中部倾斜, 因此形成了西南-东北向的渔场方向^[30]。

表 5 广义可加模型变量模拟结果和偏差分析

Tab. 5 The variables and deviance analysis for the general additive models

模型因子 model factor	残差偏差 residual deviance	累计解释偏差/% explained deviance	调整后的 R^2 adjusted R^2	赤池信息量 准则 AIC	广义交叉 验证 GCV
lg(density)~season	1803.76	4.46	0.04	3091.30	2.10
lg(density)~season+s(lon)	1742.77	7.69	0.07	3073.17	2.06
lg(density)~season+s(lon)+s(depth)	1665.41	11.80	0.11	3035.98	1.97
lg(density)~season+ s(lon)+ s(depth)+ s(Chl-a)	1613.89	14.50	0.13	3022.98	1.94
lg(density)~season+ s(lon)+ s(depth)+ s(Chl-a)+ s(SSTA)	1581.78	16.20	0.14	3014.77	1.92

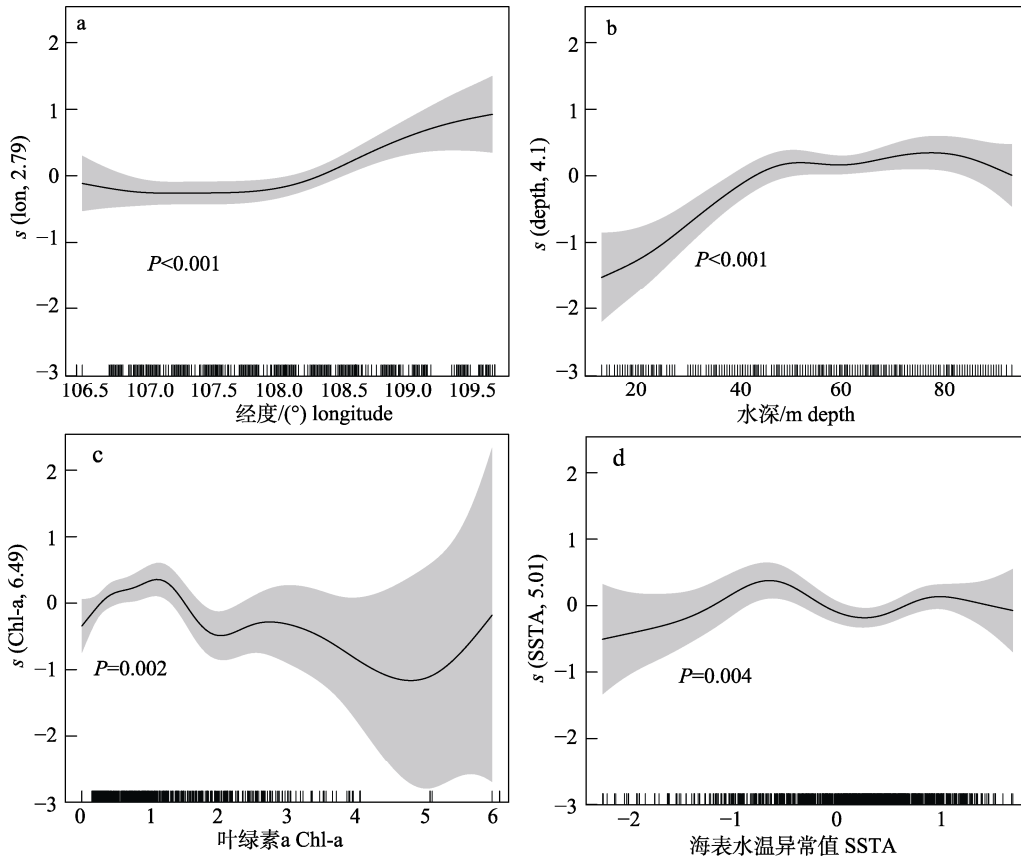


图 4 环境因子对带鱼资源密度影响的广义可加模型分析

a. 经度(Lon); b. 水深(depth); c. 叶绿素 a (Chl-a); d. 海表水温异常值(SSTA). 图中阴影部分表示 95% 的置信区间, x 轴竖直短直线表示数据点密度.

Fig. 4 Generalized additive models analysis of the effects of environment factors on density of *Trichiurus haumela*. a. Longitude (lon); b. Depth (depth); c. Chlorophyll a concentration (Chl-a); d. Sea surface temperature anomaly (SSTA). The shaded areas represent 95% confidence intervals. The vertical short lines on x-axis represent the data point density.

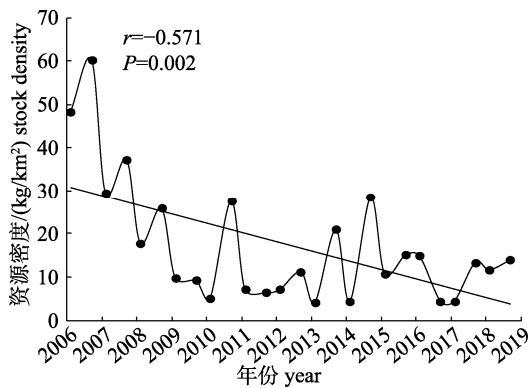


图 5 北部湾带鱼资源密度的年际变化

Fig. 5 Interannual variation of *Trichiurus haumela* stock density in the Beibu Gulf

夏季带鱼的资源密度重心移动方向整体为西南-东北向(图 2c), 在北部湾海域大范围移动。冬季带鱼的资源密度重心移动方向为南-北向(图 2b)(除

2009 年), 且主要集中在昌化外海渔场(107°20'E~108°0'E, 18°20'N~19°40'N)。昌化外海渔场位于越南岸线和海南岛西岸中间, 此处海水较深, 有利于带鱼鱼群的越冬^[30]。此外, 根据 2006 年带鱼四季的资源密度重心分布图(图 3b)可以看出, 冬季资源密度重心较夏季更偏西南, 位于较深的海域, 春、秋季位于夜莺岛南部, 处于夏、冬季资源密度重心分布位置的中间。带鱼可全年产卵, 但主要集中于春(早生群)、秋(晚生群)两季^[31]。此外, 根据贾晓平等^[30]调查研究, 北部湾带鱼鱼卵多分布于夜莺岛南部, 与本研究结果一致。

3.2 环境对带鱼资源密度和分布的影响

环境对鱼群资源密度和分布的影响机制已有诸多研究^[5,10,32-33]。研究结果显示叶绿素 a 对带鱼的资源密度和分布均影响显著($P < 0.05$), 表明浮

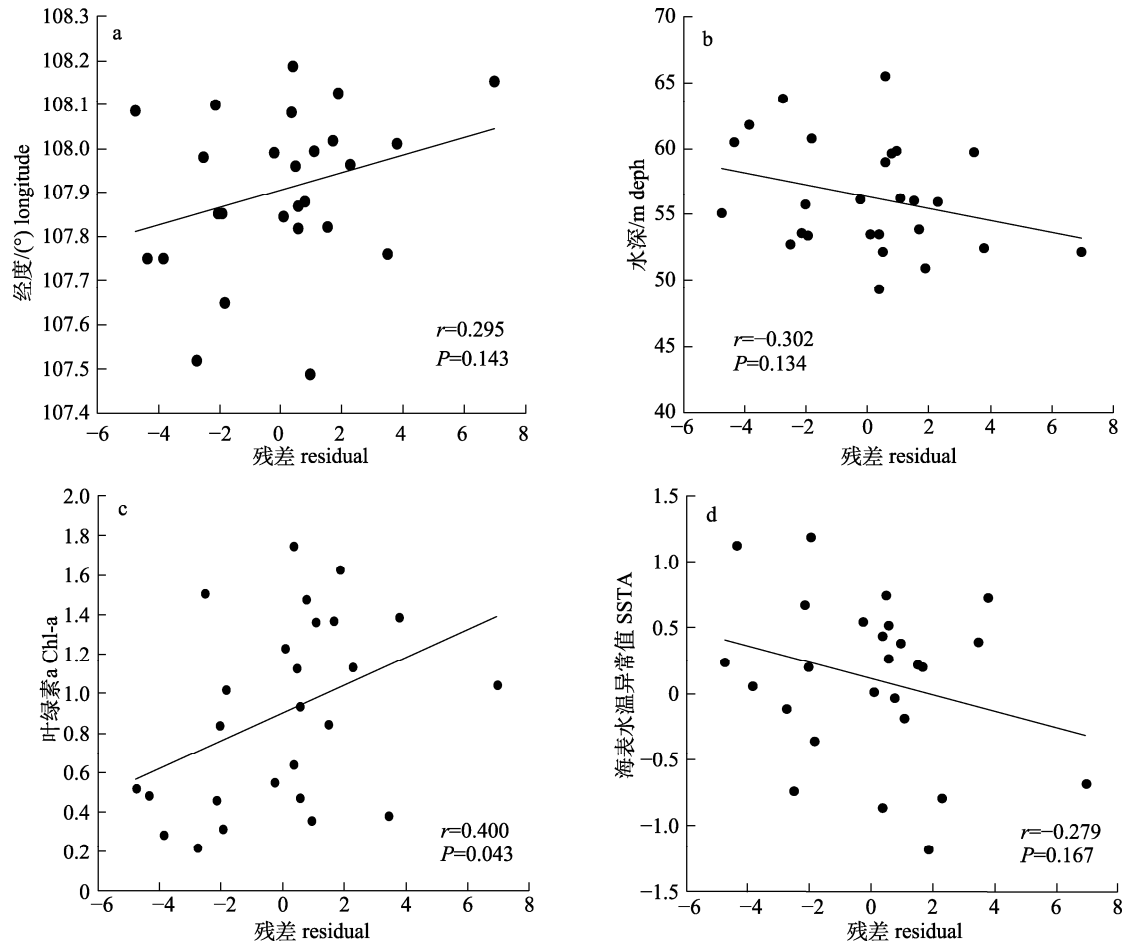


图 6 环境因子对北部湾带鱼分布的影响

a. 经度(lon); b. 水深(depth); c. 叶绿素 a (Chl-a); d. 海表水温异常值(SSTA).

Fig. 6 Influence of environment factors on distribution of *Trichiurus haumela* in the Beibu Gulf
a. Longitude (lon); b. Depth (depth); c. Chlorophyll a concentration (Chl-a); d. Sea surface temperature anomaly.

游植物通过光合作用增加水中溶氧量, 有利于鱼群的生长、发育。此外, 叶绿素 a 可通过与鱼卵及幼鱼产生效应关系, 间接地影响鱼类的资源密度和空间分布^[6,34-36]。且由于带鱼属于暖水性中下层鱼类, 故水深通过光照、溶氧、食物等影响带鱼资源密度($P < 0.05$), 但对其空间分布影响不大($P > 0.05$)。

北部湾为西、北、东三面陆地环绕的半封闭海湾, 其西北、东北有较多岛屿, 海底向湾中部倾斜^[30], 因此经度对带鱼资源密度产生一定影响($P < 0.05$), 但对其空间分布影响不大($P > 0.05$)。此外由于北部湾地处热带亚热带, 冬季受大陆冷空气, 夏季时常受台风影响, 导致海表面温度出现异常变化^[30], 对带鱼的资源密度产生一定的影响($P < 0.05$), 同样对带鱼的空间分布影响不大($P > 0.05$)。

3.3 带鱼空间聚散变化

动物的分布与丰度(生物量)之间的关系是一种普遍的生态现象, 由于种内竞争, 种群在丰度较高时扩展到次优或较差的栖息地, 而在种群丰度或其规模较低时集聚到最佳栖息地^[37-38]。这种现象也出现在许多海洋鱼类种群中, 如北大西洋鳕(*Gadus morhua*)、圣劳伦斯湾南部鳕(*Amblyraja radiata*)等^[9,39]。本研究显示带鱼种群丰度和分布均持续下降, 即随着种群数量的减少, 低密度地区个体向高密度聚集, 使得其空间分布由于个体的减少而聚缩, 保证剩下的种群能够在高密度地区维持较高的增长率, 以降低种群灭绝的风险。Hutchings^[40]同样证明当北部鳕种群丰度由于过度捕捞而下降, 但拖网调查结果显示高密度拖曳区生物量始终保持不变, 而所有低密度拖曳区生物量均

出现下降。这一现象符合种群核心分布观点^[41]。

研究表明北部湾带鱼长期处于过度捕捞($F/M=2.2>1$)及过度开发($E=0.67>0.5$)状态,资源密度呈急剧下降趋势($r=-0.571$, $P=0.002$)(图 5),相对现存生物量($B/B_0=0.16$)较低^[42]。FAO 报道,由于过度捕捞,许多鱼类种群资源量的急剧下降导致鱼群的集聚^[43]。本研究结果显示北部湾带鱼的空间分布表现显著的逐年集聚现象($r=-0.397$, $P=0.044$)(图 2d)。可见,北部湾带鱼资源密度逐年下降,导致其空间分布出现逐渐集聚现象,以维持种群的繁衍。

4 结论

北部湾带鱼空间的聚散变化主要受到资源密度的制约,即带鱼资源密度的下降导致其空间出现逐年集聚现象。环境(除叶绿素 a 外)对带鱼分布无直接影响,但可通过影响带鱼的资源密度间接影响其空间分布。

参考文献:

- [1] Feng B D. On sustainable utilization of aquatic resources in Beibu Gulf[J]. Modern Fisheries Information, 1998, 13(11): 1-4. [冯秉东. 论北部湾水产资源的可持续利用[J]. 现代渔业信息, 1998, 13(11): 1-4.]
- [2] Li K J, Qiu Y S, Wang Y Z. Influence of natural environment variation on fishery resources in the Beibu Gulf[J]. South China Fisheries Science, 2007, 3 (1): 7-13. [李寇军, 邱永松, 王跃中. 自然环境变动对北部湾渔业资源的影响[J]. 南方水产科学, 2007, 3(1): 7-13.]
- [3] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China Fishery Statistical Yearbook-2020[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020: 41. [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020, 41.]
- [4] Jin Y, Liu Z, Yan L, et al. Maturity of hairtail varies with latitude and environment in the East China Sea[J]. Marine and Coastal Fisheries, 2020, 12(6): 395-403.
- [5] Wang Y Z, Sun D R, Chen Z Z, et al. The influence of climatic environmental factors and fishing pressure on changes of hairtail catches in the northern South China Sea[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(24): 7948-7957. [王跃中, 孙典荣, 陈作志, 等. 气候环境因子和捕捞压力对南海北部带鱼渔获量变动的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7948-7957.]
- [6] Hu C L, Zhang H L, Zhang Y Z, et al. Fish community structure and its relationship with environmental factors in the Nature Reserve of *Trichiurus japonicus*[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(5): 694-703. [胡翠林, 张洪亮, 张亚洲, 等. 带鱼保护区春秋鱼类群落特征及与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2018, 42(5): 694-703.]
- [7] Planque B, Loots C, Petitgas P, et al. Understanding what controls the spatial distribution of fish populations using a multi-model approach[J]. Fisheries Oceanography, 2011, 20(1): 1-17.
- [8] Zhu Y H, Minami K, Iwahara Y, et al. Seasonal variation in fish school spatial distribution and abundance under the Kuroshio regular pattern and the large meander in Suzu coastal waters[J]. PLoS ONE, 2021, 16(11): e0260629.
- [9] Swain D P, Benoit H P. Change in habitat associations and geographic distribution of thorny skate (*Amblyraja radiata*) in the southern Gulf of St Lawrence: Density-dependent habitat selection or response to environmental change?[J]. Fisheries Oceanography, 2006, 15(2): 166-182.
- [10] Swain D P. Changes in the distribution of Atlantic cod (*Gadus morhua*) in the southern Gulf of St Lawrence—Effects of environmental change or change in environmental preferences?[J]. Fisheries Oceanography, 1999, 8(1): 1-17.
- [11] Fisher J, Frank K T. Abundance-distribution relationships and conservation of exploited marine fishes[J]. Marine Ecology Progress Series, 2004, 279: 201-213.
- [12] Perzia P, Battaglia P, Consoli P, et al. Swordfish monitoring by a GIS-based spatial and temporal distribution analysis on harpoon fishery data: A case of study in the central Mediterranean Sea[J]. Fisheries Research, 2016, 183: 424-434.
- [13] Cai Y C, Huang Z R, Li J J, et al. Stock distribution of a new record species *Nemipterus mesoprion* in offshore northern South China Sea[J]. South China Fisheries Science, 2020, 16(6): 1-11. [蔡研聪, 黄梓荣, 李佳俊, 等. 南海北部近海新记录种——苏门答腊金线鱼资源分布特征[J]. 南方水产科学, 2020, 16(6): 1-11.]
- [14] Li F K, Tanaka E, Iwata S, et al. Stock assessment of Hairtail *Trichiurus lepturus* in the East China Sea and Yellow Sea using age structured production model[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition), 2016, 35(2): 91-98. [李发凯, 田中荣次, 岩田繁英, 等. 应用年龄结构产量模型评估东黄海带鱼资源[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2016, 35(2): 91-98.]
- [15] Shi D F, Zhang K, Cai Y C, et al. Population structure of *Trichiurus japonicus* in northern South China Sea and parameters of its growth, mortality and maturity[J]. South China

- Fisheries Science, 2020, 16(5): 51-59. [史登福, 张魁, 蔡研聪, 等. 南海北部带鱼群体结构及生长、死亡和性成熟参数估计[J]. 南方水产科学, 2020, 16(5): 51-59.]
- [16] Wang Y, Xu H X. Dynamic analysis on *Trichiurus japonicus* resources in summer closed fishing syseem in East China Sea[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2009, 28(4): 384-388. [王焱, 徐汉祥. 伏季休渔制度下东海区带鱼资源动态分析[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2009, 28(4): 384-388.]
- [17] Wang X H, Qiu Y S, Du F Y, et al. Spatio-temporal variability of fish diversity and dominant species in the Beibu Gulf[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(2): 427-436. [王雪辉, 邱永松, 杜飞雁, 等. 北部湾鱼类多样性及优势种的时空变化[J]. 中国水产科学, 2011, 18(2): 427-436.]
- [18] Lyu H D. The China-Vietnam Beibu Gulf fisheries cooperation agreement expires on June 30th[J]. Ocean and Fishery, 2019(7): 12. [吕华当. 《中越北部湾渔业合作协定》6月30日到期[J]. 海洋与渔业, 2019(7): 12.]
- [19] Xiamen University School of Law. Circular of the Ministry of Agriculture of the People's Republic of China on the Implementation of China-Vietnam Fisheries Cooperation Agreement in the Beibu Gulf[R]. Chinese Oceans Law Review, 2005: 227-228. [厦门大学法学院. 中华人民共和国农业部关于实施《中越北部湾渔业合作协定》的通告[R]. 中国海洋法学评论, 2005: 227-228.]
- [20] Chen Z Z, Zhang K, Cai Y C. Fishery resources and environments in the northern South China Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 2021. [陈作志, 张魁, 蔡研聪. 南海北部近海渔业资源与环境[M]. 北京: 海洋出版社, 2021.]
- [21] Mitchell A. The ESRI Guide to GIS Analysis: Geographic Patterns & Relationships[M]. California: Esri Press, 1999.
- [22] Lin J Z. Regression analysis and linear statistical model[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2018. [林建忠. 回归分析与线性统计模型[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2018.]
- [23] 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.
- [24] Wood S N. Stable and efficient multiple smoothing parameter estimation for generalized additive models[J]. Journal of the American Statistical Association, 2004, 99(467): 673-686.
- [25] Burnham K P, Anderson D R. Model selection and multi-model inference: A practical information-theoretic approach[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2002.
- [26] Stone C J. Additive regression and other nonparametric models[J]. Ann Statist, 1985, 13(2): 689-705.
- [27] Wood S N. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology), 2011, 73(1): 3-36.
- [28] He X B, Tao Y J, Hou G, et al. Population structure and spatio-temporal distribution of *Pennahia pawak* in the beibu gulf, South China Sea[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2015, 35(3): 35-42. [何雄波, 陶雅晋, 侯刚, 等. 北部湾斑鳍白姑鱼群体结构特征与时空分布[J]. 广东海洋大学学报, 2015, 35(3): 35-42.]
- [29] Hou G, Feng Y T, Chen Y Y, et al. Spatiotemporal distribution of threadfin porgy *Eyvynnis cardinalis* in beibu gulf and its relationship with environmental factors[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2021, 41(4): 8-16. [侯刚, 冯钰婷, 陈妍颖, 等. 北部湾二长棘犁齿鲷时空分布及其与环境因子的关系[J]. 广东海洋大学学报, 2021, 41(4): 8-16.]
- [30] Jia X P, Li C H, Qiu Y S. Fishery Ecological Environment and Fishery Resources in the Beibu Gulf[M]. Beijing: Science Press, 2003: 85-87. [贾晓平, 李纯厚, 邱永松. 北部湾渔业生态环境与渔业资源[M]. 北京: 科学出版社, 2003, 12: 6-10.]
- [31] Luo B Z, Lu J W, Huang S F. Maturation of the hairtails, *Trichiurus haumela* (Pisces, Trichiuridae)—I. The process of maturation and peculiarities of the female[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1983, 14(1): 54-63, 105. [罗秉征, 卢继武, 黄颂芳. 东海北部带鱼性成熟的研究 I. 雌鱼的成熟过程与特性[J]. 海洋与湖沼, 1983, 14(1): 54-63, 105.]
- [32] Du P, Chen Q Z, Li S L, et al. Advances in the *Trichiurus lepturus* changes and habitat driving factors in the East China Sea[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2020, 40(1): 126-132. [杜萍, 陈全震, 李尚鲁, 等. 东海带鱼资源变动及其栖息地驱动因子研究进展[J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(1): 126-132.]
- [33] Wang Y Z, Sun D R, Lin Z J, et al. Analysis on responses of hairtail catches to fishing and climate factors in the Yellow Sea and Bohai Sea, China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(6): 1043-1050. [王跃中, 孙典荣, 林昭进, 等. 捕捞压力和气候因素对黄渤海带鱼渔获量变化的影响[J]. 中国水产科学, 2012, 19(6): 1043-1050.]
- [34] Yin J, Wang J, Zhang C L, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of *Larimichthys polyactis* eggs in Haizhou Bay and adjacent regions based on twostage GAM[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(6): 1164-1174. [尹洁, 王晶, 张崇良, 等. 利用 two-stage GAM 研究海州湾及其邻近海域小黄鱼鱼卵的时空分布特征[J]. 中

- 国水产科学, 2019, 26(6): 1164-1174.]
- [35] Wu S N, Chen X J. Relationship between the recruitment of the Pacific-cohort of chub mackerel (*Scomber japonicus*) and the influence factors on the spawning ground based on GLM and GAM[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(1): 61-70. [武胜男, 陈新军. 基于 GLM 和 GAM 的日本鲭太平洋群体补充量与产卵场影响因子关系分析[J]. 水产学报, 2020, 44(1): 61-70.]
- [36] 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[J]. 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[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 1023-1032.]
- [37] Marshall C T, Frank K T. Density-dependent habitat selection by juvenile haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) on the southwestern Scotian Shelf[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1995, 52(5): 1007-1017.
- [38] Swain D P, Sinclair A F. Fish distribution and catchability: What is the appropriate measure of distribution?[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1994, 51(5): 1046-1054.
- [39] Blanchard J L, Mills C, Jennings S, et al. Distribution? abundance relationships for North Sea Atlantic cod (*Gadus morhua*): Observation versus theory[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2005, 62(9): 2001-2009.
- [40] Hutchings J A. Spatial and temporal variation in the density of northern cod and a review of hypotheses for the stock's collapse[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1996, 53(5): 943-962.
- [41] Lawton J H. Range, population abundance and conservation[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1993, 8(11): 409-413.
- [42] Zhang M, Wang X H, Wang M D, et al. Assessment of *Trichiurus haumela* stocks in the Beibu Gulf based on length-based Bayesian biomass estimation method[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(1): 11-21. [张曼, 王雪辉, 王淼娣, 等. 基于长度贝叶斯生物量估算法的北部湾带鱼资源评估[J]. 海洋学报, 2022, 44(1): 11-21.]
- [43] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of world fisheries and aquaculture 2002[R]. Rome Italy: FAO, 2002: 1-51.

Spatial aggregation and dispersion characteristics of *Trichiurus haumela* in the Beibu Gulf, northern South China Sea

ZHANG Man^{1,2,3}, WANG Xuehui^{1,2,4}, CAI Yancong¹, DU Feiyan¹, SUN Dianrong¹, WANG Yuezhong¹, WANG Lianggen¹, XU Liuxiong³, QIU Yongsong¹

1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;
2. Key Laboratory of Marine Ranching, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; National Digital Fisheries (Marine Ranching) Innovation Sub-Center; Key Laboratory of Marine Ranching Technology, Chinese Academy of Fishery Sciences; Guangdong Engineering Technology Research Center of Marine Recreational Fishery, Guangzhou 510300, China;
3. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
4. Sanya Tropical Fisheries Research Institute, Sanya 572000, China

Abstract: *Trichiurus haumela* is an important economic fish in China. It is widely distributed in the South China Sea, which is one of the main producing areas of *T. haumela* in China. At present, the cognition of the distribution pattern of *T. haumela* is still insufficient. This study was conducted to provide reference for scientific management and sustainable utilization of *T. haumela* stock in this area based on the data of *T. haumela* in 2006 to 2018. The standard deviational ellipse (SDE) was adopted to analyze the spatial distribution of *T. haumela* stocks. A Generalized Additive Model (GAM) was used to study the relationship between *T. haumela* stocks and environmental factors, including chlorophylla concentration, sea surface temperature anomaly, water depth, offshore distance, longitude, and latitude. It provides scientific and technological support for sustainable utilization and protection of *T. haumela* stocks in the Beibu Gulf. The density of *T. haumela* stocks in the Beibu Gulf showed an aggregation phenomenon, and the distribution direction of the fishing ground was southwest to northeast due to the influence of the seafloor landform. The fishing ground of *T. haumela* in spring and winter was located more to the east than that in summer and autumn. In summer, the center of gravity of the fishery moved from southwest to northeast, which moved in a large area in the Beibu Gulf each year. In winter, the center of gravity of the fishing ground moved from south to north, and all moved to Changhua offshore fishing ground. The center of gravity of the *T. haumela* fishing ground in winter is more northeast than that in summer. Spring and autumn are the main spawning seasons of *T. haumela*, and the center of gravity of the fishing ground is located in the south of the nightingale fishing ground in the middle of summer and winter. The results showed that the decrease in the density of *T. haumela* stock in the Beibu Gulf was the main reason for the gradual agglomeration of its spatial distribution. Chlorophyll a had an effect on the density and spatial distribution of *T. haumela* stock, while depth, longitude, and surface temperature anomaly had an effect on the density of *T. haumela* stock but had no direct effect on its spatial distribution.

Key words: *Trichiurus haumela*; spatial distribution; environmental factor; standard deviation ellipse; generalized additive model; Beibu Gulf

Corresponding author: WANG Xuehui. E-mail: wxhscs@163.com