

文章编号: 1000-0615(2019)12-2523-10

DOI: 10.11964/jfc.20190111648

## 南海北部海域大眼鲷资源的时空异质性

刘禹希<sup>1</sup>, 王学锋<sup>1\*</sup>, 陈国宝<sup>2</sup>, 吕少梁<sup>1</sup>, 曾嘉维<sup>1</sup>

(1. 广东海洋大学水产学院, 广东 湛江 524088;

2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室, 农业部南海渔业资源环境科学观测实验站, 广东 广州 510300)

**摘要:** 研究经济鱼类的资源密度重心及其时空异质性有助于深入了解其渔场形成过程, 并为其渔业资源的可持续利用和科学管理提供参考依据。本研究基于2009—2014年南海捕捞信息网络中的南海北部海域底拖网渔业生产数据, 运用重心分布、自举法(Bootstrap)和地统计等方法研究了大眼鲷资源密度重心分布和时空异质性。结果发现, 2009—2014年大眼鲷资源密度总体上呈逐年降低的趋势, 且差异极显著, 最高值为2012年的(26.69±7.34) g/(h·kW·nets)。不同年份大眼鲷资源密度重心均分布在南海北部50~100 m等深线间, 资源密度重心年际分布差异不显著, 主要集中于调查海域中部。大眼鲷资源密度在70~90 km的尺度范围内呈强烈的空间自相关格局及良好的空间结构性(块金系数<25%), 主要受环境因素的作用; 在90 km以上的尺度范围, 空间自相关性较弱, 受随机成分影响较大。

**关键词:** 大眼鲷; 时空异质性; 空间自相关; 底拖网; 南海北部

**中图分类号:** S 931

**文献标志码:** A

营底层和近底层生活的底层鱼类是底拖网渔业的主要捕捞对象和渔业管理的重点<sup>[1]</sup>。由于底层鱼类生长期一般较长, 所处营养级较高, 更依赖于底质环境、饵料生物等生态过程, 亦更易受到捕捞的影响。

空间尺度是生态学研究的重要内容, 因为自然资源的管理都需要确定在多大尺度上实施<sup>[2-3]</sup>。重要经济鱼类资源时空分布的量化不仅是中心渔场测报的核心, 还是明晰渔业管理空间尺度及实现定量捕捞渔业管理目标的基础<sup>[2-4]</sup>。然而, 大尺度范围内渔业资源——时空数据的缺乏、不同来源和尺度下数据间可比性较低等因素, 成为中国当前渔业生态学研究的最大障碍。重要经济鱼类丰度分布的数据主要来自2种途径<sup>[5]</sup>, 一是依赖于捕捞的渔业生产调查数据(fishery dependent data); 二是基于科研调查的数据(fishery indepen-

dent data)。渔业生产调查数据在探索海洋生物的时间分布、物种出现概率与海洋环境的关系方面更具优势; 而科研调查数据更适用于评估物种出现与否的空间领域。此2种数据在探索物种分布范围方面, 其结果均处于同一个预测区域内(环境包络范围, envelope), 它们的综合应用、交叉验证要优于仅使用其中一类数据<sup>[6]</sup>。

大眼鲷(*Priacanthus* spp.)是南海底拖网捕捞的重要底层鱼类之一<sup>[7]</sup>。南海北部海域尤以短尾大眼鲷(*Priacanthus macracanthus*)和长尾大眼鲷(*Priacanthus tayenus*)为主, 二者栖息水层、分布范围相近<sup>[8]</sup>。目前关于大眼鲷的分类<sup>[9]</sup>、分布<sup>[7]</sup>、个体发育<sup>[10]</sup>、年龄生长及资源评估<sup>[11-12]</sup>和繁殖生物学等<sup>[13]</sup>已开展了一系列研究, 而关于大眼鲷资源分布的异质性存在与否及其形成原因等尚未见报道。基于地统计学的渔业资源时空格局分析, 从

收稿日期: 2019-01-29 修回日期: 2019-04-29

资助项目: 公益性行业科研专项(201403008); 农业农村部财政项目“南海海洋捕捞生产结构调查”(640); 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)资助项目(ZJW-2019-06)

通信作者: 王学锋, E-mail: xuefeng1999@126.com

变异函数的角度定量描述渔业资源的时空异质性<sup>[14-15]</sup>,可有效避免因运用经典统计学研究方法而忽视生物种群空间的自相关性所产生的结果偏差。本研究根据2009—2014年南海渔船信息动态监测网络获取的数据,以底拖网渔获大眼鲷为例研究重要经济鱼类的时空异质性,有助于明晰其渔场变动规律,为今后渔业资源捕捞总量控制与配额管理提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

渔业数据来自农业部专项调查项目——南海渔船信息动态监测网络,调查时间为2009—2014年的1—5月和8—12月(南海休渔期除外),调查范围为111.00°~116.00° E, 18.00°~22.75° N (图1)。底拖网调查渔船54艘(囊网最小尺寸均为2 cm),渔船功率(127~1 545) kW,总作业网次4 370网。因大眼鲷价格无种间差别,仅与个体大小和保鲜程度有关,故渔民未将大眼鲷类区分到种,统一归为“大眼鲷”类。本研究将大眼鲷视为一个渔获种类(对象),以短尾大眼鲷、长尾大眼鲷为主<sup>[16]</sup>。

### 1.2 分析方法

将经纬度0.25°×0.25°定义为一个渔区,其中心点表示该渔区位置,编号1~125(图1)。统计各渔区底拖网生产数据,按年计算其单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE)[g/(h·kW·nets)],并表征大眼鲷资源密度。

$$CPUE = \frac{Y}{M \times f}$$

式中,  $Y$ 为某渔区某年的单位小时渔获量(g/h),  $M$ 为该年在此渔区作业的渔船功率数(kW),  $f$ 为该渔区该年的作业网次数(nets)。

本研究假设CPUE与大眼鲷资源密度成正比,采用秩和检验比较南海北部海域大眼鲷资源密度的年间(2009—2014年)差异。

对各年渔区中心点的经纬度以资源密度为权重进行加权平均,确定大眼鲷资源密度重心随年际变化的轨迹。公式<sup>[14]</sup>:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \times D_i}{\sum_{i=1}^n D_i}$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \times D_i}{\sum_{i=1}^n D_i}$$

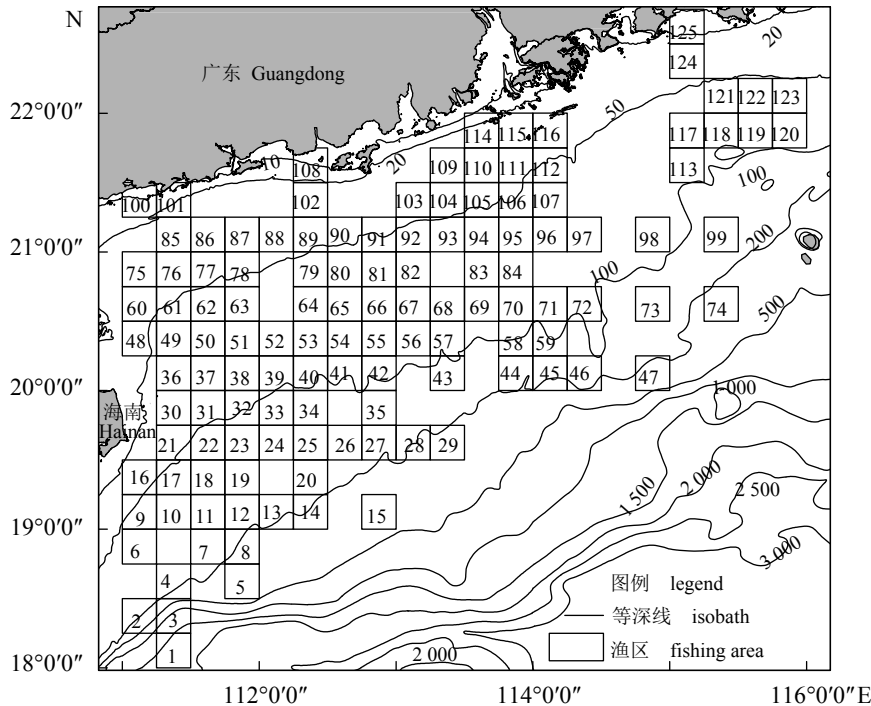


图1 2009—2014年南海北部海域大眼鲷资源调查渔区图

Fig. 1 Surveyed fishing area for *Priacanthus* spp. in the northern South China Sea from 2009 to 2014

式中,  $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 分别为某年大眼鲷资源密度重心的纬度、经度,  $X_i$ 、 $Y_i$ 分别为该年*i*渔区中心点的纬度及经度,  $D_i$ 为*i*渔区中心点的资源密度,  $n$ 为该年渔区数。

不同年份大眼鲷重心分析结果的观测误差可能会使调查结果出现偏差, 故采用自举法(Bootstrap)分析大眼鲷重心的置信区间, 并比较重心年际变化的显著性<sup>[14]</sup>。

运用地统计方法之前, 用Kolmogorov-Smirnov拟合优度检验分析数据的正态性; 若不符合则采用对数变换使其满足要求<sup>[17]</sup>。

变异函数可从区域化变量的角度, 通过基于自然界空间数据的描述, 来分析其空间变异及相关性。公式<sup>[18]</sup>:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E [z(x) - z(x+h)]^2$$

式中,  $\gamma(h)$ 为变异函数,  $z(x)$ 和 $z(x+h)$ 分别为位置*x*和(*x+h*)处的大眼鲷资源密度,  $E[z(x) - z(x+h)]^2$ 是滞后距离为*h*时大眼鲷资源密度方差的数学期望。

变异函数的拟合形式主要包含线性模型、指数模型、高斯模型和球状模型, 其中线性模型构造最简单, 指数模型和高斯模型没有截然的变程(变程表示空间相关范围的大小)<sup>[19]</sup>。模型拟合效果与决定系数成正比, 与残差平方和成反比, 后者的模型拟合效果更佳<sup>[20]</sup>, 故本研究选用残差平方和评判模型的拟合效果, 并根据块金值等参数进行分析<sup>[14]</sup>。块金系数为块金值与基台值的比值, 表示由随机成分导致的空间异质性在总变异中的占比<sup>[21]</sup>: 占比在25%~75%内, 空间自相关性中等; 小于该区间, 自相关性强, 异质性低; 大于该区间, 则反之。

但上述模型均未考虑生物及非生物因子分布与方向密切相关的特性<sup>[19]</sup>, 本研究运用分维数对各异质性深入研究。对抽样间隔*h*及对应的变异函数 $\gamma(h)$ 分别取对数, 得到双对数曲线, 分维数*D*估算<sup>[22]</sup>为:

$$D = 2 - m/2$$

式中,  $m$ 为双对数曲线的斜率。分维数作为变异函数的曲率, 表示随机变异的程度, 其值越接近1, 区域化变量的线性分布越明显, 空间自相关越强; 越接近2, 则随机性分布越明显, 空间自相关越弱。

采用GS+软件绘制大眼鲷资源密度的变异函数散点图及拟合变异函数, 对其时空异质性定量描述。

## 2 结果

### 2.1 大眼鲷CPUE的年际变化

2009—2014年大眼鲷CPUE总体上呈逐年降低的趋势(图2)。大眼鲷CPUE的最高值出现在2012年, 为(26.69±7.34) g/(h·kW·nets); 最低值出现在2013年, 为(8.00±0.93) g/(h·kW·nets)。不同年份的大眼鲷CPUE差异极显著( $P < 0.01$ )。

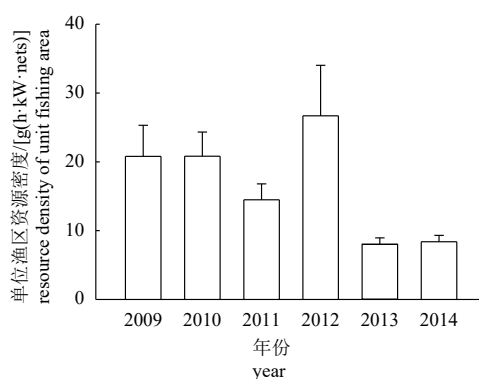


图2 2009—2014年南海北部海域单位渔区大眼鲷CPUE的年际变化

Fig. 2 Annual variations of CPUE of unit fishing area about *Priacanthus* spp. in the northern South China Sea from 2009 to 2014

### 2.2 大眼鲷CPUE分布重心的时空变化

不同年份大眼鲷CPUE重心均分布在南海北部50~100 m等深线间的较小空间尺度内。以2009年大眼鲷CPUE的分布重心为起点(图3), 2010年向东移至57号渔区, 2011年较2010年略向西南移动, 但仍处于57号渔区内; 2009—2011年在100 m等深线附近的56和57号渔区形成聚集趋势; 2012年较2011年朝西北方向呈大幅移动(到79号渔区), 2013年、2014年较2012年移动幅度较小, 有向2009—2011年CPUE重心回归的趋势。

在南海北部海域, 大眼鲷CPUE重心年际分布差异不显著( $P > 0.05$ ), 相对集中在调查海域中部(图3)。从2009—2014年大眼鲷CPUE分布重心95%的经纬度置信区间(Bootstrap法, 表1)可知, 不同年份的CPUE重心经纬度置信区间均有重叠, 且大部分年份重心都位于置信区间内(除2010

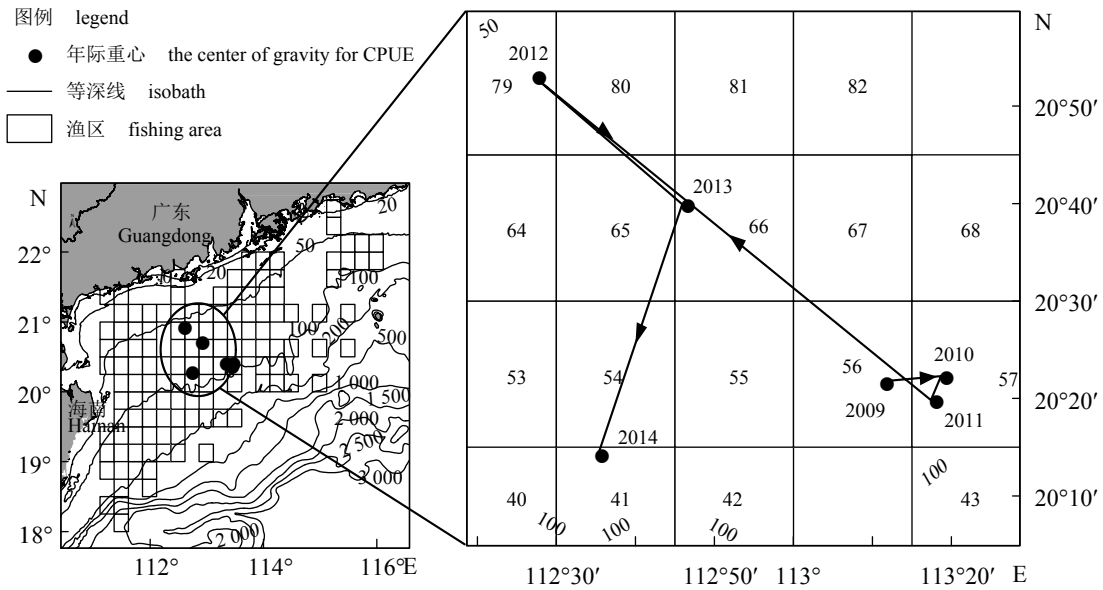


图3 2009—2014年南海北部海域大眼鲷CPUE重心移动轨迹

箭头指向为年际变化的趋势

Fig. 3 Moving trends of the center of gravity about CPUE of *Priacanthus* spp. in the northern South China Sea from 2009 to 2014

The annual moving trends showing with arrows

表1 2009—2014年南海北部海域大眼鲷CPUE重心的置信区间(95%)

Tab. 1 Confidence intervals for the central of gravity about CPUE of *Priacanthus* spp. in the northern South China Sea from 2009 to 2014 (95%)

年份 year	经度/(°) longitude	置信区间 confidence interval		纬度/(°) latitude	置信区间 confidence interval	
2009	113.185	112.661	113.254	20.362	20.133	20.540
2010	113.311	112.514	113.270	20.371	20.137	20.625
2011	113.290	112.634	113.347	20.330	20.287	20.741
2012	112.451	112.385	112.995	20.885	20.410	20.840
2013	112.765	112.629	113.264	20.666	20.479	20.924
2014	112.584	112.366	112.932	20.239	20.112	20.594

年重心经度和2012年重心纬度以外)。

### 2.3 时空异质性分析

根据2009—2014年大眼鲷CPUE计算变异函数值，绘制不同年份的变异函数散点图，选取最优拟合模型(图4、表2)。

2009年—2014年的块金值变化范围较小(图5-a)，表明空间变异受随机成分影响较小。2012年块金值达到最大值，说明该年较小取样尺度下有重要的生态过程。2010和2011年块金值最小且相同，其受随机成分影响的空间变异程度均小于其他年份。

2009—2014年基台值(表征采样区整体的变异的)变动特征与块金值类似(图5-b)，并受随机成分和结构性影响。由此可知，大眼鲷CPUE在6年总体和年际2种时间尺度上的结构性变异均大于由随机成分所导致的空间变异，即大眼鲷在调查海域内表现出较强的空间自相关趋势。

2010和2011年块金系数都接近0，说明大眼鲷CPUE在这2个年份的空间异质性基本受中尺度结构性成分影响。2009—2011年，因空间自相关引起的中尺度空间异质性占比均小于25%，故CPUE表现出较强的空间自相关特征；2012—2014年则都表现出中等的空间自相关。因此，在大眼

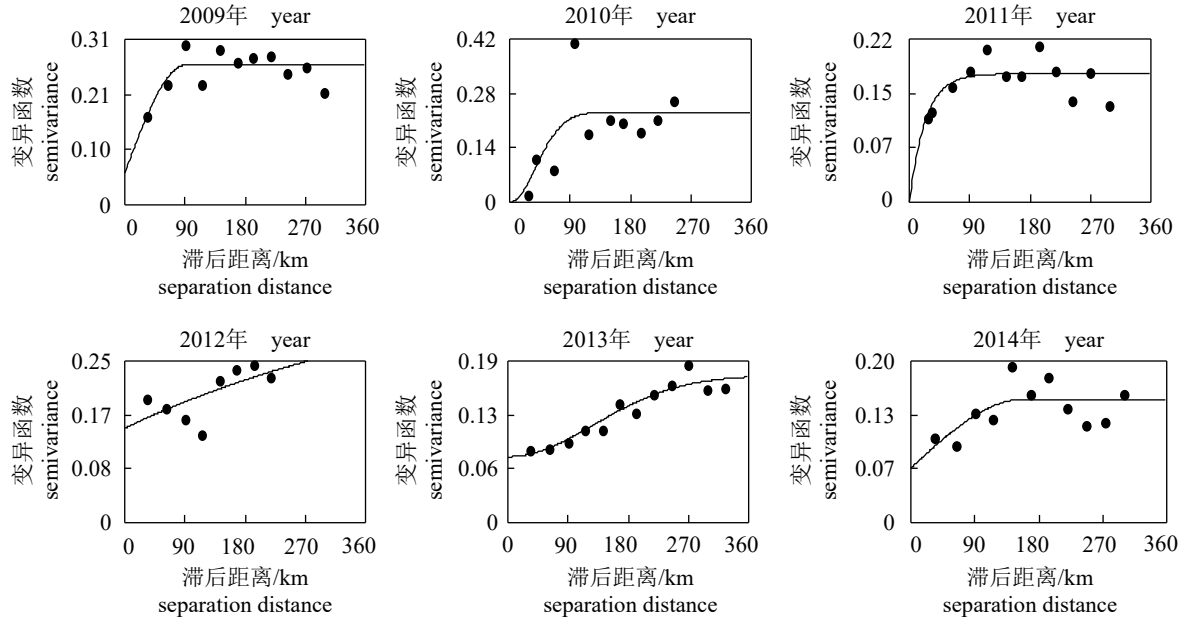


图 4 2009—2014年南海北部海域大眼鲷CPUE变异函数散点图及拟合模型

Fig. 4 Semivariogram plots and fitted model for CPUE of *Priacanthus* spp. in the northern South China Sea from 2009 to 2014

表 2 2009—2014年南海北部海域大眼鲷CPUE变异函数理论模型参数

Tab. 2 Parameters of semivariogram theoretical model for CPUE of *Priacanthus* spp. in the northern South China Sea from 2009 to 2014

年份 year	有效滞后距/km active lag distance	理论模型 theoretical model	块金值 nugget	基台值 sill	块金系数 nugget/sill	变程/km range	残差平方和 RSS	分维数 <i>D</i>
2009	323.554	球状模型	0.061	0.262	0.233	90.80	0.007	1.937
2010	251.075	高斯模型	<0.001	0.231	<0.001	96.48	0.053	1.574
2011	304.512	指数模型	<0.001	0.231	<0.001	71.70	0.006	1.942
2012	230.273	指数模型	0.146	0.397	0.369	1 533.00	0.006	1.924
2013	323.554	高斯模型	0.078	0.173	0.448	315.06	0.001	1.826
2014	323.096	球状模型	0.068	0.152	0.444	157.10	0.005	1.916

鲷空间分布中, 结构性成分起主要作用。

除2012年, 其余年份间变程差异均较小(图5-c)。2009—2011年变程均小于100 km; 年际间CPUE与变程波动趋势基本一致, 故一定程度上体现了大眼鲷CPUE的年际变动。6年间变程在70~90 km范围内, 大眼鲷CPUE具强烈空间自相关, 空间结构性表现很好。

本研究以正北方向为起点, 按顺时针方向, 计算年际间大眼鲷CPUE各向同性及四个角度的分维数(图5-d)。基于各向同性, 2010年大眼鲷CPUE空间异质性最强。基于各向异性, 2013年CPUE各方向差异最小, 2010年差异最大。2010年在90°N方向, 较其他年份各方向均具有更强

的空间自相关性特征, 空间依赖性较明显, 结构性成分在空间异质性中占比变大, 并受到多种生态过程不同程度的影响。2011和2012年45°N方向, 空间变异主要受随机成分影响, 大眼鲷CPUE空间自相关最弱, 且分布较均匀, 接近同质。

### 3 讨论

#### 3.1 资源密度的年际变化

第一, 2009—2014年大眼鲷资源密度总体表现出逐年降低的趋势。渔民长期过度捕捞是短尾大眼鲷和长尾大眼鲷资源量降低、捕捞群体小型化的重要影响因素。1999年南海开始实行

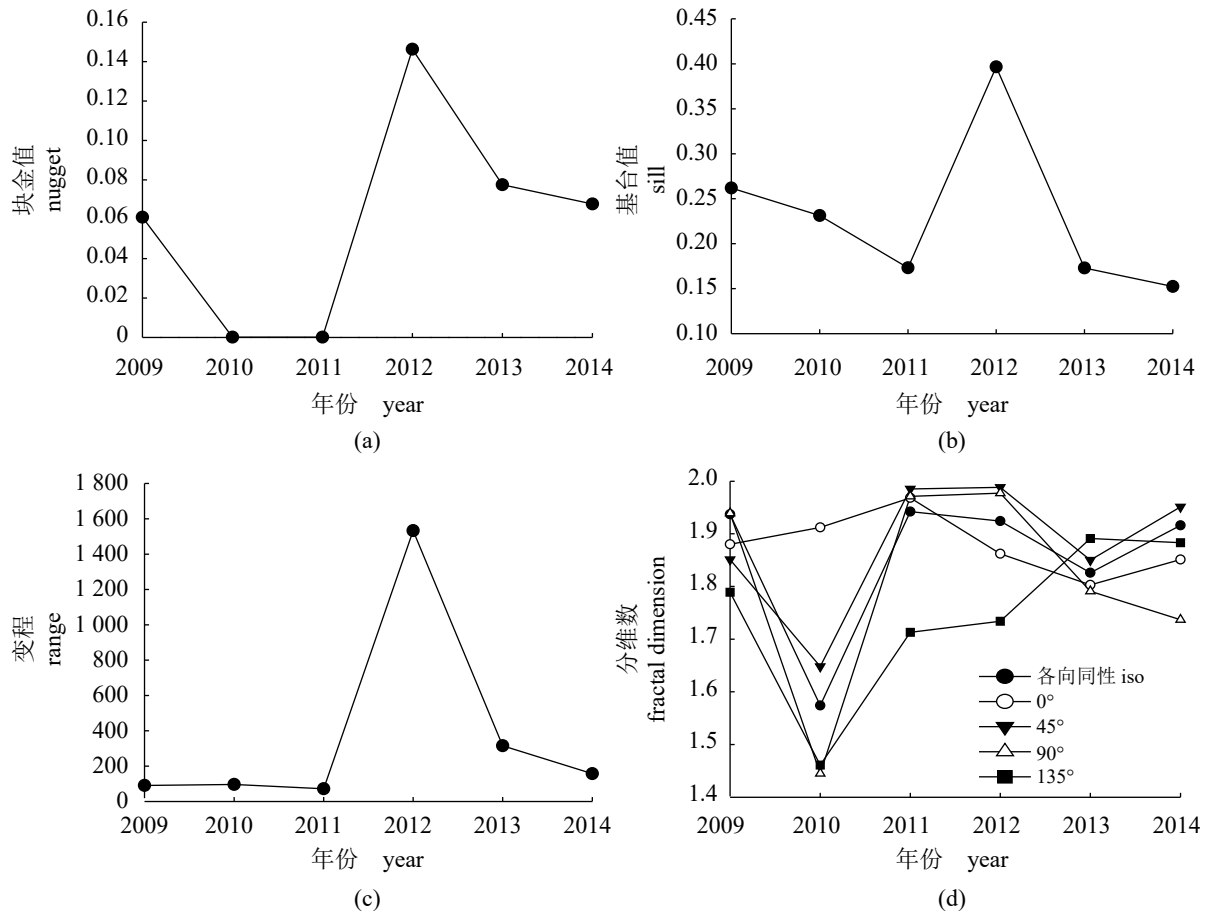


图 5 2009—2014年南海北部海域大眼鲷CPUE的变异函数参数

Fig. 5 Semivariogram parameters for CPUE of *Priacanthus* spp. in the northern South China Sea from 2009 to 2014

休渔政策, 但禁渔期后时值大眼鲷幼鱼的发育时期, 而渔民休渔后的高强度捕捞可能影响到了大眼鲷资源的补充群体生长<sup>[8]</sup>。第二, 纪世建等<sup>[23]</sup>和郭禹<sup>[24]</sup>等学者认为盐度可能影响鱼类的觅食与产卵, 是年际渔获量产生较大波动的主要外因之一。2009—2014年期间, 2012年相较于其他年份南海平均海表盐度异常值最大<sup>[25]</sup>; 与2012年大眼鲷资源密度显著高于其他年份的特征相似; 大眼鲷资源密度的变化可能与平均海表盐度异常有关, 二者间的关系尚需进一步研究。

### 3.2 资源密度分布重心时空格局

首先, 本研究不同年份大眼鲷资源密度重心皆位于50~100 m等深线以内, 与短尾大眼鲷和长尾大眼鲷在南海北部40~90 m深海域内资源密度最高<sup>[8]</sup>的特征基本一致。其次, 2009—2011年大眼鲷资源密度重心位于100 m等深线附近, 而2012—2014年重心则从50 m等深线附近向深水区迁移, 这与2012年南海平均海表盐度异常值激

增且后续年份逐渐降低<sup>[25]</sup>的变化趋势相似; 即2009—2014年期间, 在加强的沃克环流调制下, 南海淡水通量增加, 表层盐度淡化现象明显, 可能影响该年重心向50 m等深线附近海域迁移; 反之, 则向100 m等深线附近迁移; 与纪世建等<sup>[23]</sup>和郭禹等<sup>[24]</sup>得出盐度变化可能影响鱼类分布的观点一致。除深度及盐度外, 其他环境及饵料因素的综合影响也可能导致大眼鲷重心发生迁移, 后续可深入研究。

### 3.3 时空异质性分析

南海北部海域大眼鲷资源密度的空间变异特征是基于采样尺度的函数, 采样间距的选取直接影响变异特征的真实程度<sup>[26]</sup>。采样间距充分小, 样本量足够大, 越贴合采样区域的真实变异情况<sup>[27]</sup>, 而基于所研究鱼类的分布特征及调查经济性的考量, 达到上述条件是苛刻的, 张继光等<sup>[28]</sup>认为有效滞后距小于最大变程的一半即可。本文研究区域的最大有效滞后距为323.55 km,

最大变程为1 533.00 km(表2),表明采样间距合理,变异函数的拟合模型可靠,较真实的反映出大眼鲷资源密度的空间变异特征,可作为南海北部海域后续大眼鲷采样研究工作的参考<sup>[29]</sup>。

空间变异函数模型的种类揭示了鱼群依赖于当前环境的聚集分布程度<sup>[17,20,30]</sup>,其中球状模型聚集分布较强,指数模型和高斯模型为中等程度的聚集分布。首先,本研究通过比较不同年份的变异函数模型种类(表2),确定在南海北部调查海域内,大眼鲷具有中等程度的聚集分布。其次,2009—2014年间,球状模型出现在拉尼娜现象明显的年份,高斯模型和指数模型则主要出现在厄尔尼诺现象和正常年份<sup>[31]</sup>,与杨晓明等<sup>[17]</sup>结论一致。

除2012年块金值呈现剧烈变化的趋势外,其余年份变化幅度均不大,表明2012年南海北部海域大眼鲷资源密度在低于最小采样间距下的空间自相关具有明显的波动特征。贾晓平等<sup>[8]</sup>指出:南海北部海域短尾大眼鲷年龄范围为0~3龄;从2009年开始,每三年划分为一个周期,则年际间块金值表现出持续降低的循环结构,说明南海北部海域大眼鲷资源密度的空间自相关可能与大眼鲷的年龄组成与生命历程有关,故反映出明显的周期性波动趋势。

有研究基于相关系数和块金系数判别空间相关性水平<sup>[28, 32]</sup>。本研究在南海北部海域的年际调查渔区数为43~72个,不符合周国法等<sup>[32]</sup>提出样本量大于120个的判断前提,故以块金系数确定年际间大眼鲷资源密度空间相关性水平。本研究期间,2009—2011年南海北部海域大眼鲷资源密度空间自相关性强,2012—2014年空间自相关性中等。大眼鲷资源密度的空间分布受结构性和随机成分的综合影响,如环境条件和人类行为等,使空间自相关水平提升或降低<sup>[33]</sup>,时空异质性产生差异。

年际间变程对于科学管理大眼鲷渔业资源具有重要指导意义。本研究年际间资源密度变化趋势仅与变程一致,而苏奋振等<sup>[15, 34]</sup>和张寒野等<sup>[35]</sup>得出鱼类资源密度还与块金值、基台值和分维数等相关,说明影响南海北部海域大眼鲷资源密度年际变化的主要因素为空间自相关规模的大小,而与结构性成分、随机成分等所引起的空间变异关系较小。同时通过与上述学者的研究对比,可推测基于某一时间尺度,受空

间变异所影响的资源密度变化可能与鱼的种类、栖息环境、地理位置和季风等因素有关,有待后续进一步研究。

大眼鲷资源密度各向异性受海流及冲淡水影响。由广东沿岸流、南海暖流和南海黑潮分支构成的南海北部中上层海流的流向<sup>[36]</sup>与年际间分维数普遍较高的45°N和135°N方向对应,即大眼鲷资源密度较均匀分布的方向与南海北部中上层海流流向有关。此外,受珠江冲淡水影响的珠江口渔场浮游植物丰富<sup>[37]</sup>,是鱼类栖息的重要海域。表层及底层珠江冲淡水全年均向西扩展<sup>[38]</sup>,大部分年际90°N方向也相应表现出较高的分维数。

本研究表明,大眼鲷资源密度在70~90 km的空间尺度内块金系数小,该尺度内环境因素是影响空间分布主要作用因子,而更大尺度的南海北部大眼鲷的空间异质性特征及其影响因素复杂,仍需进一步深入,如环境、生物饵料因素的分布特征与大眼鲷自身的空间分布特征相互影响<sup>[14, 27]</sup>,以及大眼鲷属内各种的差异等。

#### 参考文献:

- [1] 胡翠林,张洪亮,张亚洲,等.带鱼保护区春秋季节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.  
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(in Chinese).
- [2] Hurlbert A H, Jetz W. Species richness, hotspots, and the scale dependence of range maps in ecology and conservation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(33): 13384-13389.
- [3] Takashina N, Baskett M L. Exploring the effect of the spatial scale of fishery management[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2016, 390: 14-22.
- [4] Wilen J E. Spatial management of fisheries[J]. *Marine Resource Economics*, 2004, 19(1): 7-19.
- [5] Grazia Pennino M, Muñoz F, Conesa D, et al. Bayesian spatio-temporal discard model in a demersal trawl fishery[J]. *Journal of Sea Research*, 2014, 90: 44-53.
- [6] Paradinas I, Marín M, Grazia Pennino M, et al. Identifying the best fishing-suitable areas under the new

- European discard ban[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2016, 73(10): 2479-2487.
- [7] 邱永松, 曾晓光, 陈涛, 等. 南海渔业资源与渔业管理[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 115-179.
- Qiu Y S, Zeng X G, Chen T, *et al.* Fisheries Resources and Management in the South China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008: 115-179(in Chinese).
- [8] 贾晓平, 李永振, 李纯厚, 等. 南海专属经济区和大陆架渔业生态环境与渔业资源[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 358-472.
- Jia X P, Li Y Z, Li C H, *et al.* South China Sea Exclusive Economic Zone and the Continental Shelf Fisheries Eco-Environment and Fishery Resources[M]. Beijing: Science Press, 2004: 358-472(in Chinese).
- [9] 熊丹, 李敏, 李永振, 等. 南海短尾大眼鲷线粒体Cyt b基因序列及种群判别分析[J]. 中国水产科学, 2016, 23(1): 188-197.
- Xiong D, Li M, Li Y Z, *et al.* Sequence analysis of the mitochondrial cytochrome b gene and identification of the *Priacanthus macracanthus* population in the South China Sea[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(1): 188-197(in Chinese).
- [10] Lester R J G, Watson R A. Growth, mortality, parasitism, and potential yields of two *Priacanthus* species in the South China Sea[J]. *Journal of Fish Biology*, 1985, 27(3): 307-318.
- [11] 张魁, 陈作志, 王跃中, 等. 北部湾短尾大眼鲷群体结构及生长、死亡和性成熟参数估计[J]. 热带海洋学报, 2016, 35(5): 20-28.
- Zhang K, Chen Z Z, Wang Y Z, *et al.* Population structure of *Priacanthus macracanthus* in the Beibu Gulf, and parameters for its growth, mortality and maturity[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2016, 35(5): 20-28(in Chinese).
- [12] 孙典荣, 邱永松. 南海北部大陆架短尾大眼鲷生长和死亡参数估计[J]. 湛江海洋大学学报, 2004, 24(1): 28-34.
- Sun D R, Qiu Y S. Estimation of growth and mortality parameters of *Priacanthus macracanthus* in the North Continental Shelf of South China Sea[J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 2004, 24(1): 28-34(in Chinese).
- [13] Liu K M, Hung K Y, Joung S J. Estimate of reproductive value of the big eye *Priacanthus macracanthus* in the north-eastern waters off Taiwan[J]. *Fisheries Science*, 2002, 68(3): 523-528.
- [14] 都煜, 徐宾铎, 薛莹, 等. 海州湾及邻近海域日本枪乌贼时空分布的异质性[J]. 中国水产科学, 2017, 24(3): 558-565.
- Du Y, Xu B D, Xue Y, *et al.* Analysis of temporal and spatial heterogeneity of Japanese squid (*Loliolus japonica*) in Haizhou Bay and adjacent waters[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(3): 558-565(in Chinese).
- [15] 苏奋振, 周成虎, 仇天宇, 等. 东海水域中上层鱼类资源的空间异质性[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1971-1975.
- Su F Z, Zhou C H, Zhang T Y, *et al.* Spatial heterogeneity of pelagic fishery resources in the East China Sea[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1971-1975(in Chinese).
- [16] 陈大刚, 张美昭. 中国海洋鱼类[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2015: 1004-1009.
- Chen D G, Zhang M Z. *Marine Fishes of China*[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2015: 1004-1009(in Chinese).
- [17] 杨晓明, 戴小杰, 朱国平. 基于地统计分析西印度洋黄鳍金枪鱼围网渔获量的空间异质性[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4682-4690.
- Yang X M, Dai X J, Zhu G P. Geostatistical analysis of spatial heterogeneity of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) purse seine catch in the western Indian Ocean[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4682-4690(in Chinese).
- [18] 李海滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 651-657.
- Li H B, Wang Z Q, Wang Q C. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6): 651-657(in Chinese).
- [19] 葛剑平, 郭海燕, 仲莉娜. 地统计学在生态学中的应用( I ): 基本理论和方法[J]. 东北林业大学学报, 1995, 23(2): 88-94.
- Ge J P, Guo H Y, Zhong L N. Geostatistics in ecology( I )—Basic theory and methods[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1995, 23(2): 88-94(in Chinese).
- [20] 赵斌, 蔡庆华. 地统计学分析方法在水生态系统研究中的应用[J]. 水生生物学报, 2000, 24(5): 514-520.
- Zhao B, Cai Q H. An application of geostatistical



- analysis in freshwater ecosystem[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, 24(5): 514-520(in Chinese).
- [21] 刘爱利, 王培法, 丁园圆. 地统计学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 167-179.  
Liu A L, Wang P F, Ding Y Y. An Introduction to Geostatistics[M]. Beijing: Science Press, 2012: 167-179(in Chinese).
- [22] Carr J R, Benzer W B. On the practice of estimating fractal dimension[J]. *Mathematical Geology*, 1991, 23(7): 945-958.
- [23] 纪世建, 周为峰, 程田飞, 等. 南海外海渔场渔情分析预报的探讨[J]. *渔业信息与战略*, 2015, 30(2): 98-105.  
Ji S J, Zhou W F, Cheng T F, *et al.* On the forecast and analysis of fishing grounds in the open South China Sea[J]. *Fishery Information & Strategy*, 2015, 30(2): 98-105(in Chinese).
- [24] 郭禹, 陈国宝, 于杰, 等. 南海北部马面鲷渔获率初步研究[J]. *水产科学*, 2016, 35(2): 123-129.  
Guo Y, Chen G B, Yu J, *et al.* Catch rate of filefish in northern South China Sea[J]. *Fisheries Science*, 2016, 35(2): 123-129(in Chinese).
- [25] 傅圆圆, 程旭华, 张玉红, 等. 近二十年南海表层海水的盐度淡化及其机制[J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(4): 18-24.  
Fu Y Y, Cheng X H, Zhang Y H, *et al.* The freshening trend of surface salinity in the South China Sea in recent two decades and its mechanism[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2017, 36(4): 18-24(in Chinese).
- [26] 李灵智, 王磊, 刘健, 等. 大西洋金枪鱼延绳钓渔场的地统计分析[J]. *中国水产科学*, 2013, 20(1): 198-204.  
Li L Z, Wang L, Liu J, *et al.* Geostatistical analysis of tuna (*Thunnus obesus*) longline fishing grounds in the Atlantic Ocean[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(1): 198-204(in Chinese).
- [27] Western A W, Blöschl G. On the spatial scaling of soil moisture[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 217(3-4): 203-224.
- [28] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 喀斯特山区洼地表层土壤水分的时空变异[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 6334-6343.  
Zhang J G, Chen H S, Su Y R, *et al.* Spatial and temporal variability of surface soil moisture in the depression area of Karst hilly region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6334-6343(in Chinese).
- [29] van Groenigen J W, Siderius W, Stein A. Constrained optimisation of soil sampling for minimisation of the kriging variance[J]. *Geoderma*, 1999, 87(3-4): 239-259.
- [30] 方学燕, 冯永玖, 陈新军, 等. 6-9月秘鲁外海茎柔鱼资源的时空异质性研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2016, 25(2): 271-281.  
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(in Chinese).
- [31] 王兆毅, 刘桂梅, 王辉, 等. 吕宋海峡水交换季节和年际变化特征的数值模拟研究[J]. *海洋学报*, 2016, 38(5): 1-13.  
Wang Z Y, Liu G M, Wang H, *et al.* Numerical study of seasonal and interannual variation of circulation and water transports in the Luzon Strait[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(5): 1-13(in Chinese).
- [32] 周国法, 徐汝梅. 生物地理统计学: 生物种群时空分析的方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 27-29.  
Zhou G F, Xu R M. Biogeostatistics: Methodology and Application of Spatial Analysis of Biology Species[M]. Beijing: Science Press, 1997: 27-29(in Chinese).
- [33] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 557-563.  
Guo X D, Fu B J, Ma K M, *et al.* Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS—A case study in Zunhua City of Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 557-563(in Chinese).
- [34] 苏奋振, 周成虎, 史文中, 等. 东海区底层及近底层鱼类资源的时空异质性[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 683-686.  
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(in Chinese).
- [35] 张寒野, 胡芬. 冬季东海太平洋褶柔鱼的空间异质性特征[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(11): 1299-1302.  
Zhang H Y, Hu F. Spatial heterogeneity of *Todarodes pacificus* in East China Sea in winter[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(11): 1299-1302(in Chinese).
- [36] 黄企洲, 王文质, 李毓湘, 等. 南海海流和涡旋概况[J]. *地球科学进展*, 1992, 7(5): 1-9.  
Huang Q Z, Wang W Z, Li Y X, *et al.* General situations of the current and eddy in the South China Sea[J]. *Advances in Earth Sciences*, 1992, 7(5): 1-9(in Chinese).

- [37] 卢素兰. 珠江口生态环境季节变化的模拟研究[D]. 广州: 中山大学, 2005: 1-8.  
Lu S L. The numerical study of the seasonal variations on the ecological environment in the Pearl River Estuary[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2005: 1-8(in Chinese).
- [38] 杨阳, 李锐祥, 朱鹏利, 等. 珠江冲淡水季节变化及动力成因[J]. 海洋通报, 2014, 33(1): 36-44.  
Yang Y, Li R X, Zhu P L, *et al.* Seasonal variation of the Pearl River diluted water and its dynamical cause[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(1): 36-44(in Chinese).

## Spatiotemporal heterogeneity of *Priacanthus* spp. resources in the northern South China Sea

LIU Yuxi<sup>1</sup>, WANG Xuefeng<sup>1\*</sup>, CHEN Guobao<sup>2</sup>, LÜ Shaoliang<sup>1</sup>, ZENG Jiawei<sup>1</sup>

(1. College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environment; Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

**Abstract:** It's helpful to know the formation of fishing grounds by the center of gravity of fish resource density and temporal and spatial heterogeneity. The traditional economic fish resources are declining owing to the impact of overfishing, environmental change and other factors. *Priacanthus* spp., the main catches in bottom trawls in the South China Sea, are important ecologically. But few studies on their spatial-temporal patterns of distribution are available, and spatial autocorrelation of data is also scarce in the studies. Analysis of temporal and spatial heterogeneity on the distribution of *Priacanthus* spp. in the northern South China Sea has been essential for sustainable development and rational management of the fishery. To investigate temporal and spatial distribution of *Priacanthus* spp. resource density, we used the data of bottom trawl fishery in the northern South China Sea by a fishery information network from 2009 to 2014, for spatial analysis of center of gravity and semivariogram plots to investigate temporal and spatial distribution of *Priacanthus* spp. resource density. The results showed that the resource density of *Priacanthus* spp. decreased gradually and the differences were extremely significant ( $P < 0.01$ ) from 2009 to 2014. The maximum value of resource density was  $(26.69 \pm 7.34)$  g/h/kW/nets in 2012. The center of gravity of the resource density which was distributed between the 50-m and 100-m isobath in the middle part of the survey area, had no significant difference ( $P > 0.05$ ). The spatial distribution of *Priacanthus* spp. showed a well-organized structure, with strong spatial autocorrelation in 70–90 km. Spatial heterogeneity in resource density of *Priacanthus* spp. appeared to be caused less by randomness than by structural variations. The spatial distribution of *Priacanthus* spp. showed weak spatial autocorrelation when the distance exceeded 90 km.

**Key words:** *Priacanthus* spp.; spatiotemporal heterogeneity; spatial autocorrelation; bottom trawl; the northern South China Sea

**Corresponding author:** WANG Xuefeng. E-mail: xuefeng1999@126.com

**Funding projects:** Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201403008); Ministry of Agriculture Financial Project "Survey on the fishing production structure in the south China sea (640)"; Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Zhanjiang) (ZJW-2019-06)