



2018年夏季南奥克尼群岛南极磷虾资源丰度 多尺度空间异质性

万树杰^{1,2}, 朱国平^{1,2,3,4*}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学极地研究中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学, 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室极地海洋生态系统研究室, 上海 201306;

4. 上海海洋大学, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 南极磷虾是南大洋中上层生态系统的关键物种, 也是我国远洋渔业的重要捕捞对象, 充分了解其空间分布特征可为南极磷虾资源的持续开发和利用提供理论支撑。基于2018年夏季南奥克尼群岛南极磷虾资源声学调查数据, 将研究海域按经纬度划分为7个空间尺度, 利用地统计学方法研究不同尺度下南极磷虾资源丰度的空间异质性特征。结果显示: ①随着空间尺度的增大, 块金值和块基比逐渐减小, 偏基台值和基台值先减小后增大又减小, 空间尺度为40'×40'时最大; ②不同空间尺度下, 模型的拟合效果不同, 球状模型在空间尺度为20'×20'和50'×50'时拟合效果最好, 指数模型在空间尺度为10'×10'时拟合效果最好, 高斯模型在空间尺度为30'×30'、40'×40'和60'×60'时拟合效果最好, 拟合结果均表现出较强的空间自相关性; ③磷虾资源丰度空间结构显示, 基于各向异性, 分维值在尺度为50'×50'时方向差异最小, 在60'×60'时方向差异最大; 基于各向同性, 分维值在尺度为60'×60'时最小, 50'×50'时最大。研究表明, 南奥克尼群岛南极磷虾资源丰度存在明显的空间异质性, 其致因与南奥克尼群岛的海洋流场、水团交换引起的营养物质、温盐跃层的变化等外在环境因素, 以及南极磷虾自身的行为方式等内在因素有关。

关键词: 南极磷虾; 声学; 地统计分析; 空间尺度; 南奥克尼群岛

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

南极磷虾 (*Euphausia superba*), 通常指南极大磷虾, 资源量极为丰富, 呈环南极分布。作为南大洋食物网中承上启下的关键物种, 南极磷虾是整个南大洋海域能量流动的重要一环, 是南大洋中上层生态系统保持稳定的基石^[1]。国内外许多学者对南极磷虾渔场的空间变动进行了研究, 诸多研究大多以单位捕捞努力量渔获

量 (CPUE) 作为磷虾资源的丰度指标, 以探究环境因子与磷虾资源分布之间的相关关系^[2-6]。以往采用传统的统计方法, 即通过样本属性的频率分布、均值、方差关系等, 这些研究确定了南极磷虾渔场空间分布格局与相关性。而南极磷虾常以不同规模的集群形式分布在特定的空间上, 因此具有高度的空间异质性。传统的统

收稿日期: 2019-11-04 修回日期: 2020-01-20

资助项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1406801); 国家自然科学基金 (41776185); 农业农村部南极海洋生物资源开发利用项目 (125C0505)

第一作者: 万树杰 (照片), 从事渔业声学研究, E-mail: sjwan@shou.edu.cn

通信作者: 朱国平, E-mail: gpzhu@shou.edu.cn



计方法往往忽略了空间位置和距离对样本空间分布的影响,具有一定的局限性^[7]。地统计学则以变异函数为基础,提供了较有效的定量分析,成为解释在空间分布上既有结构性又有随机性自然现象的工具,在渔业生态领域得到了一定的应用^[8-11]。CPUE通常由渔业数据估算而得,其空间分辨率多武断地以经、纬度0.5°×0.5°或1.0°×1.0°为主,以此表征的资源丰度往往会存在偏差。通过南极磷虾资源调查获取的声学数据,覆盖海域面积广,在不影响南极磷虾集群特征及周围环境的情况下,可以较为客观地反映南极磷虾资源的分布情况。此外,南大洋的环境复杂,南极磷虾生活的环境也一直处于动态的变化中,这使得目前尚无合适的方法确定南极磷虾资源丰度的最适空间尺度。基于此,本研究选取2018年南极磷虾资源调查声学数据,采用地统计方法,对不同尺度下南极磷虾资源丰度空间变异情况进行分析,以期为更好地探究南极磷虾资源丰度的空间分布提供参考,为南极磷虾渔业研究提供科学的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究采用2018年1月27日—2月7日南极磷虾资源调查所采集的声学数据,调查海域为南奥克尼群岛海域(59°~61°S, 41°~50°W)(图1),经、纬度间隔为1°×0.5°,共9个调查断面。调查时采用不间断走航的方式采集数据。

1.2 研究方法

声学数据处理 声学数据处理主要包括

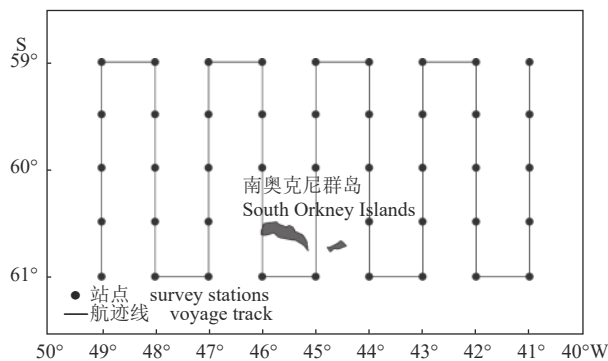


图1 研究区域和站点分布
Fig. 1 Study area with the distribution of sampling stations

海表、海底混响噪声剔除,环境背景噪声剔除和目标生物信号的检测,详细的数据处理流程参见文献^[12-18]。最终获得海洋面积散射系数(nautical area scattering coefficient, NASC), NASC值为指示磷虾分布的有效指数,一般与资源量呈正相关^[19]。以上基于Echoview V 6.3软件完成。

尺度划分与数据探索分析 首先将研究区域按经、纬度10'×10'、20'×20'、30'×30'、40'×40'、50'×50'、60'×60'和70'×70'等7个空间尺度进行划分,形成大小不同的网格,再分别统计不同尺度下各网格内NASC值的个数与大小,取算术平均值作为网格的数值,取网格中心点的经纬度作为网格的经、纬度,最后将其栅格化,同时将经、纬度坐标转换为平面坐标。以上基于ArcGIS V 10.3软件完成。在半变异函数分析之前,先对数据进行正态分布检验,不同空间尺度下的样本量不一样,本研究中对样本量大于50的大样本数据采用Kolomogorov-Semirnov (K-S)检验;样本量小于50的小样本数据采用Shapiro-Wilk(S-W)检验;以上两种检验方法均为95%的置信度,即P>0.05时没有显著性差异,样本服从正态分布,反之则存在显著性差异。对于不满足正态分布的数据进行Box-Cox转换,使其满足正态分布的要求,以上基于Python V 3.7软件完成。

地统计分析 地统计学(geostatistics),亦称地质统计学,近年来又被称为空间信息统计学(spatial information statistics),是一门以区域化变量理论为基础,以变差函数为基本工具,研究那些在空间分布上既具有随机性又具有结构性的自然现象的学科。南极磷虾的资源量为区域化变量,可通过不同栅格间资源量的差异定量分析资源量的空间异质性^[20-22]。半变异函数是分析区域化变量空间异质性的工具之一,其数学解释:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中, N(h)为被h分割的数据对(x_i, x_i + h)的对数, Z(x_i)和Z(x_i + h)分别为x_i和x_i + h处样本的测量值, h为分割两样点的距离。

半变异函数常用的曲线拟合模型有球状模型、指数模型和高斯模型,一般用模型拟合结果的决定系数(coefficient of determination, R²)和

残差项来筛选最优模型, 决定系数越大, 残差越小, 模型的拟合效果越好^[23]。半变异函数拟合曲线中, C_0 为块金方差, 又叫块金值, 其大小反映变量的随机程度, 表示磷虾资源密度由随机因素引起的空间变异^[23-24]; 基台值为块金值和偏基台值的总和 ($C_0 + C_1$), 其大小反映变量变化幅度的大小, 表示磷虾资源量总空间变异程度^[23-24], 其中 C_1 为结构方差, 又叫偏基台值, 其表示资源量由空间结构引起的空间变异^[23-24]; $C_0/(C_0 + C_1)$ 的值可用于判断系统内变量的自相关程度, <25%时为强空间自相关性, 25%~75%时为中等自相关性, >75%为弱自相关性。空间自相关可能仅依赖于两个位置之间的距离, 这被称为各向同性, 如事物在某些方向上比在其他方向上更相似, 也就是半变异函数和协方差中均存在这种方向性影响, 它被称为各向异性^[23-24]; A 为变程, 表示以 A 为半径的领域内任何其他 $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 间存在的空间相关性, 或者 $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 相互有影响^[23-24]。它与观测尺度以及在取样尺度上影响磷虾资源丰度的各种生态过程相互作用有关。将变异函数曲线图取双对数坐标可得到双对数曲线图, 其中 m 为双对数曲线的斜率, 则分维数 D 可用下式估算:

$$D = 2 - m/2 \quad (2)$$

式中, D 表示变异函数曲线的曲率, 是一个无量纲的数, 作为随机变量的度量, 其值越接近2, 说明小尺度上的变异越显著^[25]。以上基于GS+ V 9.0软件完成。

根据变异函数的原理, 空间变异函数模型表示空间分布的总体特征类型, 在生态学中, 不同函数模型可以反映物种对环境背景的适应性特征, 模型的最优性由残差项 (residual item, SS) 和决定系数 R^2 决定, 一般来说 R^2 越大, SS越小, 表明模型的拟合效果越好。变异曲线的分维数可以度量空间上随机变异程度的大小, 分维数 D 越小表明方向相关性越强, 该方向上生态过程影响越明显, 由空间自相关部分引起的空间异质性越高^[26]。

2 结果

2.1 声学数据的统计分析

整个调查海域中, 统计处理后的NASC值共计2964个数据点。原始数据的K-S检验表明,

各尺度下的数据均不符合正态分布, 对各尺度下的数据进行Box-Cox转换, 转换后数据的K-S检验均满足正态分布, 转换系数和 P 值如表1所示。在7个尺度下分别将这些数据栅格化, 随着空间尺度的逐渐增大, 有数据点的栅格数目逐渐下降; 各栅格的最小值、最大值和均值均呈现出先降低后增大再降低的趋势, 这些统计值的最大值均出现在40'×40'的空间尺度下。

2.2 南极磷虾资源量空间异质性建模

利用半变异函数以及拟合模型得到不同空间尺度下的 C_0 、 C_1 、 $C_0 + C_1$ 、 $C_0/(C_0 + C_1)$ 以及 A (表2)。由整体变化状态来看, 这些参数均随着尺度的变化呈现出不同程度的波动, 且不同的模型表现出不同的拟合效果, 这表明南极磷虾资源量的空间异质性存在明显的空间尺度效应。当空间尺度达到70'×70', 由于数据量不足已无法进行拟合, 故最终得到了6个空间尺度下的建模结果。

球状模型、指数模型以及高斯模型的 C_0 变异范围分别为0.001~4.530、0.001~2.760和0.001~5.600。3个模型的 C_0 随着尺度的增大均呈现出下降的趋势, 10'×10'的空间尺度下 C_0 达最大; 在尺度域(10', 40')内, C_0 表现出较大幅度的波动; 在尺度域(50', 60')内, C_0 较小且变化较小, 这种随机因素主要与资源量的空间尺度、采样间距及复杂的周围环境有关。

球状模型、指数模型以及高斯模型的 C_1 变异范围分别为1.478~30.600、1.478~34.700和0.997~30.310; 3种模型变化趋势一致, 均表现出随着空间尺度的增大先减小后增大的趋势, 其中在尺度域为(30', 50')内出现了剧烈的波动, 空间尺度为30'×30'时, C_1 最小, 当空间尺度为40'×40', C_1 达到最大, 且远大于其他尺度下的值, 即空间尺度由30'×30'增大到40'×40'时, 南极磷虾的空间结构发生了较大变化; 在其他尺度下数值变化则比较平稳。

$C_0 + C_1$ 的总空间变异变化状态与 C_1 变化状态相似, 在40'×40'的空间尺度下, 3个模型的 $C_0 + C_1$ 最大, 30'×30'时 $C_0 + C_1$ 最小, 这进一步表明南奥克尼群岛在不同尺度下的南极磷虾资源量变异性变化状态更容易受自身空间结构因素的影响, 且不同空间尺度下, 影响程度的差异性较大, 因此空间结构因素对南极磷虾资源量

表 1 不同空间尺度下的数据统计量

Tab. 1 Statistical data at different spatial scales

空间尺度 spatial scale	样本数量 number of sampling	最小值 min value	最大值 max value	均值 mean value	标准差 SD	转换系数 conversion coefficient	<i>P</i>
10'×10'	142	4.38	21.12	12.24	0.30	0.25	0.066
20'×20'	77	4.97	12.18	8.90	0.21	0.15	0.180
30'×30'	54	4.51	8.23	6.42	0.13	0.05	0.087
40'×40'	40	8.13	28.69	18.65	0.85	0.35	0.075
50'×50'	29	6.44	12.04	8.99	0.29	0.15	0.255
60'×60'	27	6.19	11.41	8.74	0.29	0.15	0.239
70'×70'	16	7.22	11.31	9.04	0.32	0.15	0.343

表 2 不同空间尺度下的半变异函数理论模型及相关参数

Tab. 2 Semi-variance theory model and related parameters at different spatial scales

空间尺度 spatial scale	理论模型 model	块金值 (C_0) nugget value	偏基台值 (C_1) partial value	基台值 (C_0+C_1) sill value	变程 (A) range/m	块基比 $C_0/(C_0+C_1)$	分布格局 distribution pattern
10'×10'	S	4.530	8.550	13.080	109 000	0.346	聚集分布
	E	2.760	10.570	13.330	118 800	0.207	聚集分布
	G	5.600	7.440	13.040	88 161	0.429	聚集分布
20'×20'	S	0.200	3.261	3.461	130 400	0.058	聚集分布
	E	0.010	3.604	3.614	164 700	0.003	聚集分布
	G	0.843	2.631	3.474	115 528	0.243	聚集分布
30'×30'	S	0.001	0.999	1.000	146 800	0.001	聚集分布
	E	0.001	1.099	1.100	226 500	0.001	聚集分布
	G	0.001	0.997	0.998	111 717	0.001	聚集分布
40'×40'	S	0.010	30.600	30.610	166 300	≈0	聚集分布
	E	0.100	34.600	34.700	273 900	≈0	聚集分布
	G	0.010	30.310	30.410	122 455	≈0	聚集分布
50'×50'	S	0.001	2.249	2.250	135 800	≈0	聚集分布
	E	0.001	2.416	2.417	186 900	≈0	聚集分布
	G	0.001	2.269	2.270	112 929	≈0	聚集分布
60'×60'	S	0.001	2.583	2.539	260 200	≈0	聚集分布
	E	0.001	3.011	3.012	449 700	≈0	聚集分布
	G	0.001	2.420	2.421	173 551	≈0	聚集分布

注: S. 球状模型, E. 指数模型, G. 高斯模型, $C_0/(C_0+C_1)$. 块基比

Notes: S. spherical model, E. exponential model, G. Gaussian model, $C_0/(C_0+C_1)$. the ratio of nugget value to sill value

的空间变异的影响是不可忽略的。

从整体变化上看, A 随着尺度的增大而上下波动, 高斯模型中 A 的波动范围最小; 其中球状模型、指数模型以及高斯模型中的 A 分别为 66 700~260 200、5 100~449 700 和 88 161~173

511 m; 3 种模型在 10'×10' 的空间尺度下 A 最小, 60'×60' 的空间尺度下 A 最大。

除了以上特征参数, $C_0/(C_0+C_1)$ 也是研究资源量空间异质性的特征变量之一。在整个尺度域上, $C_0/(C_0+C_1)$ 的变异范围为 0~0.346, 随着尺

度的增大而减小，当空间尺度大于 30' 时， $C_0/(C_0+C_1)$ 基本不再变化，且最终趋于 0，块金效应较弱。在 10'×10' 的空间尺度下，指数模型表现出强空间自相关性 (<0.25)，球状模型和高斯模型均表现出中等空间自相关性 (<0.5)；当空间尺度大于 10'×10' 时，每个模型的 $C_0/(C_0+C_1)$ 均 <0.25，表现出强空间自相关性。总体分析，在尺度域 (30', 60') 之间，每个模型的拟合结果均显示，南极磷虾资源呈聚集分布的状态。

2.3 南极磷虾资源量空间异质性最优模型

各拟合模型在不同尺度下的残差项变化较大，但变化趋势基本一致，呈现出下降升高再下降的情况 (图 2-a)。球状模型、指数模型和高

斯模型均显示，空间尺度为 10'×10' 和 40'×40' 时的残差项均明显大于其他空间尺度，30'×30' 时空间尺度下的残差项小于其他尺度。其中，40'×40' 的空间尺度下，指数模型的残差项最大，高斯模型最小；在 30'×30' 的空间尺度下，指数模型的残差项最大，高斯模型残差项最小。残差项的波动情况表明，空间尺度的变化会对模型拟合的稳定性产生较大影响。3 个模型的残差项在尺度达到 40'×40' 时均出现显著的增大，其他尺度则比较平稳。相较于残差项，模型的决定系数 R^2 波动幅度较小 (图 2-b)，3 个模型的 R^2 为 0.688~0.978，其中最佳拟合模型中 R^2 最小值为 0.778，说明整体的拟合效果较好。

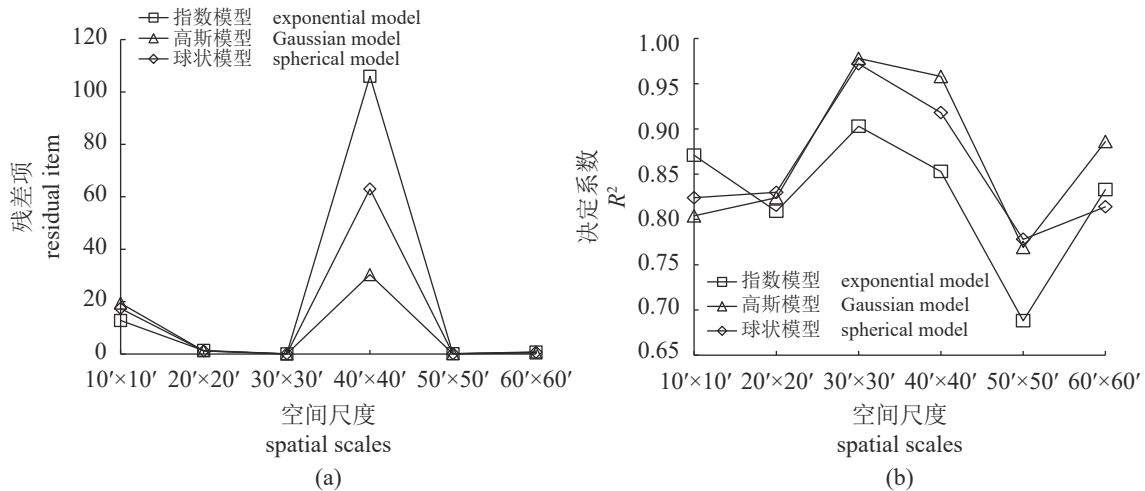


图 2 不同空间尺度下模型残差项 (a) 和决定系数 (b) 的变化图

Fig. 2 Variation in value of residual term (a) and R^2 (b) at different spatial scales

综合来看，球状模型在空间尺度为 20'×20' 及 50'×50' 时的拟合效果最好，占整体最优模型的 33.33%；指数模型在空间尺度为 10'×10' 时的拟合效果最好，占整体最优模型的 16.67%；高斯模型在空间尺度为 30'×30'、40'×40' 及 60'×60' 时的拟合效果最好，占整体最优模型的 50%。

2.4 南极磷虾资源量多尺度方向空间异质性特征

本研究计算了不同尺度下南极磷虾资源量各向同性及 4 个角度的分维数，方向以正北方向为 0°，按照顺时针方向增加 (图 3)。

基于各向异性， D 在尺度为 50'×50' 时方向差异最小，在 60'×60' 时方向差异最大；其中南北方向 (0°N) 和东南-西北方向 (135°N) 上的空间相关性随着尺度的增大未出现明显变化，整体

相关性均较弱；东北-西南方向 (45°N) 和东西方向 (90°N) 在尺度域 (30', 50') 内的 D 非常接近且

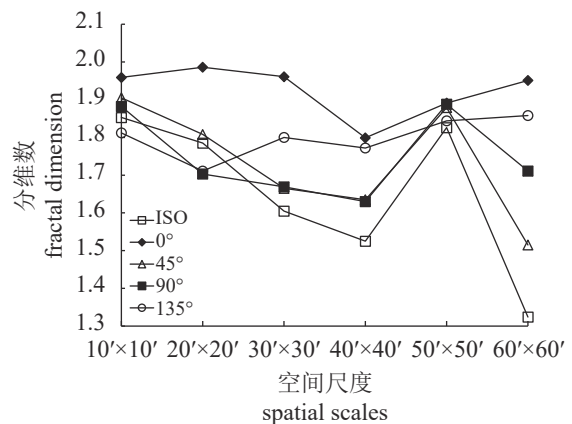


图 3 不同空间尺度下各方向角的分维数

Fig. 3 Fractal dimension value at different spatial scales

较大, 表现出相似的弱空间相关性, 此时空间变异主要受随机成分影响, 且分布较均匀, 接近同质。在各向同性 (ISO) 情况下, 在尺度域 (10', 40') 内, 随着尺度的增大, 空间相关性逐渐增强, 在 60'×60' 的空间尺度下, 空间相关性最强 (值最小)。

3 讨论

3.1 多尺度效应分析

由分析结果来看, 基于声学数据表征的南奥克尼群岛的南极磷虾资源丰度表现出明显的空间分布特征, 且存在一定的空间异质性。空间异质性结构的参数会随着空间尺度的不同而发生变化, 且不同空间尺度下的参数存在较大波动, 说明大尺度下容易忽视小尺度上的随机性和尺度效应。

本研究中, 块金值随着空间尺度的增大逐渐减小, 当空间尺度大于 30' 时, 块金值基本不再发生变化, 且数值较小, 块金值的变化表示随机因素引起的空间变异, 其中的随机因素主要由栅格内部存在的空间异质性造成。这与采用的数据处理方法有关, 由于各栅格内部包含了不同大小和地理位置的数据点, 即本研究中的 NASC 值。因此, 栅格内部的数据点间存在一定的空间异质性。同时, 本研究的数据处理方式取数据点的算数平均值和栅格的中心点坐标, 在平均化的过程中, 会导致一定尺度域内部分位置的数值突然增大或减小, 特别是本身没有数据点的位置, 这种不可控制的随机因素会导致在部分尺度域内 NASC 值的空间异质性出现大幅度的波动。这种情况在杨铭霞等^[27]的研究中也有所体现, 但与后者不同, 本研究采用更为客观的声学数据, 而杨铭霞等^[27]的研究均以 CPUE 作为数据来源。

偏基台值表示由空间结构引起的空间变异, 基台值表示总的空间变异程度。由研究结果可知, 同一尺度下偏基台值远大于块金值; 因此, 对南极磷虾来说, 由自身空间结构引起的空间变异占总变异程度的比重较大。可以发现, 偏基台值与基台值均有着随着空间尺度的增大而减小又增大的变化情况, 即 3 个参数值在尺度域 (10', 30') 时呈现下降趋势, 在尺度域 (40',

60') 时也呈现下降趋势, 在空间尺度从 30'×30' 增大到 40'×40' 时, 偏基台值与基台值出现剧烈的波动, 且 40' 时的 2 个值均远大于其他尺度。块基比表示南极磷虾资源丰度的空间自相关程度, 其随着空间尺度的增大而减小, 且均 < 25%, 表明南极磷虾资源丰度的空间自相关性逐渐增强, 当空间尺度达到 40'×40' 时, 块基比接近于零。因此, 南奥克尼群岛南极磷虾资源丰度的空间异质性主要由空间自相关性决定, 而强空间自相关性也表明, 南极磷虾的资源呈聚集分布状态。

本研究认为, 导致这种情况发生的可能原因是南极磷虾的集群特性^[28-29], 即南极磷虾本身个体较小, 生存能力较差, 通过集群, 南极磷虾可以更加容易地获取食物, 有利于雌雄个体间的交配, 并降低单尾南极磷虾游泳所消耗的能量, 帮助其躲避来自捕食者的攻击。所以, 典型的集群特征就会表现出磷虾自身的强空间自相关特性和其资源丰度的聚集分布状态。同时, 一定数量的南极磷虾会在其集群内部自然生成一个微小环境, 这些环境中南极磷虾个体又是一种竞争关系, 它们会争夺氧气和食物, 同时排出自身的代谢废物, 引起寄生虫和疾病的发生^[29]。集群的大小为几十米至数百千米不等^[30], 不同集群间的空间结构有所差异, 而同一集群内部的空间结构也有所差异。所以, 当不同的空间尺度覆盖不同数目和不同大小的南极磷虾集群时, 各尺度栅格内的空间结构会产生较大差异。为此, 需要进一步了解南极磷虾集群的内部结构特征, 才能更好地解释其集群行为对自身资源丰度空间异质性的影响机制。由本研究结果可知, 当空间尺度为 40'×40' 时, 南极磷虾资源丰度的空间结构变异最大, 这为南极磷虾集群特征研究提供了一定的参考。

3.2 海洋环境对空间异质性的影响

南极磷虾的生存环境复杂^[31-32], 其摄食与繁殖受海水温度、盐度和叶绿素等因素的影响。因自身游泳能力弱, 南极磷虾的分布与海流及水团等因子密切相关。由此可以推断, 南奥克尼群岛水域南极磷虾的空间异质性可能来源于两个方面: 一是南极磷虾游泳能力较弱, 海流对南极磷虾移动有较大的影响, 而且海流等的

运动还伴随着营养物质、温度、盐度等的改变,对南极磷虾的摄食、生长及繁殖均有一定影响;二是南极磷虾典型的昼夜垂直移动行为,相关研究表明南极磷虾白天所处水层深度为150 m,夜晚则多处于表层(50 m左右)^[33-35]。

南极半岛海域主要存在南极绕极流(Antarctic circumpolar current, ACC)和威德尔环流(Weddell gyre, WG)两个大尺度环流^[36],其中WG的范围为南极半岛东侧至30°E,而南奥克尼群岛正处于WG的影响范围之内。处于WG西北侧的暖深层水(warm deep water, WDW)和威德尔海深层水(Weddell sea deep water, WSDW)一部分进入埃斯佩里兹海槽,这些水体的性质会在埃斯佩里兹海槽内顺时针流动时发生变化^[37];然后部分水体通过南奥克尼海台西部的通道进入斯科舍海;另一部分沿着WG向东流动,绕南奥克尼海台流动一周,通过奥克尼通道进入斯科舍海^[38]。根据Garabato等^[39]的研究,奥克尼通道深层存在较强的向西海流,南极底层水(Antarctic bottom water, AABW)在威德尔海的形成速率为 $8.4 \times 10^6 \sim 11 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,通过奥克尼通道的WSDW有 $5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,即约一半的WSDW通过奥克尼通道进入斯科舍海。所以,南奥克尼群岛为斯科舍海与威德尔海水交换的重要流经区域。

Murphy等^[40]利用物理-生物模型研究南极磷虾分布的季节性变化,采用拉格朗日粒子追踪方法探索海流影响下的南极磷虾分布,结果表明在大多数情况下,南极磷虾的分布主要受ACC的影响。Murphy等^[40]还发现,夏秋季节南极磷虾生物量较大区域内颗粒物质的输送主要来自于上一年冬季海冰覆盖的区域,因此海冰的消退也会对南极磷虾分布产生影响。南极磷虾会随着海流的流向进行移动,两个海区的营养盐也会进行交换;海流的流动会输送丰富的营养物质和浮游生物,水团的交换也会影响海水的温度;海冰的消退模式和速率也会对海水的温盐性质产生影响。当营养物质出现富集或者南极磷虾所处水层的温度适宜其生存时,南极磷虾空间格局的聚集程度就会加强,小尺度上的空间格局会更为明显,在模型参数上就表现为变程较小,结构性较好;此时,空间异质性的研究应该以中小尺度为宜。如果缺少大范围 and 稳定的营养物质输送,浮游生物、温度、盐度等因素均无法满足大量南极磷虾聚集时,

<https://www.china-fishery.cn>

南极磷虾会在一定程度上散开以摄食或进行其他行为,这会导致空间分布的随机性增强,空间自相关程度减弱。与之相类似的是,多数研究表明,南极磷虾的昼夜垂直移动现象多表现为白天聚集下潜,夜间分散上浮^[33-35]。所以,不同时间段的磷虾有不同的分布状态:南极磷虾白天表现出聚集状态,空间格局的聚集程度也会加强;当夜间状态分散时,会增强空间分布的随机性。

感谢中国辽宁大连海洋渔业有限公司南极磷虾渔船“福荣海”轮船长和船员在数据收集过程中给予的支持与帮助。感谢中国南极磷虾渔业科学观察员在海上数据收集过程中所付出的辛勤劳动。

参考文献 (References):

- [1] 朱国平. 南极磷虾种群生物学研究进展I—年龄、生长与死亡[J]. 水生生物学报, 2011, 35(5): 862-868.
Zhu G P. Population biology of Antarctic krill *Euphausia superba*. I - age, growth and mortality[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2011, 35(5): 862-868(in Chinese).
- [2] 杨晓明, 朱国平. 南极大西洋扇区磷虾渔业渔获率突变特征及其致因分析[J]. 中国水产科学, 2014, 21(5): 1056-1064.
Yang X M, Zhu G P. Mutation characteristics and the effect on catch rates in Antarctic krill fishery in the Atlantic Sector of the Antarctic Ocean[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(5): 1056-1064(in Chinese).
- [3] 朱国平, 徐怡瑛, 夏辉, 等. 2009/2010-2011/2012渔季中国南极磷虾渔业渔场时空变动[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(3): 425-431.
Zhu G P, Xu Y Y, Xia H, et al. Spatial-temporal variation on fishing ground of Chinese Antarctic krill fishery in 2009/2010 to 2011/2012 fishing season[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(3): 425-431(in Chinese).
- [4] 朱国平. 基于广义可加模型研究时间和环境因子对南极半岛北部南极磷虾渔场的影响[J]. 水产学报, 2012, 36(12): 1863-1871.
Zhu G P. Effects of temporal and environmental factors on the fishing ground of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the northern Antarctic Peninsula based on generalized additive model[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(12): 1863-1871(in Chinese).

中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- [5] 孙珊, 李显森, 赵文武, 等. 基于广义可加模型分析时空和环境因子对2013年南极磷虾资源分布的影响[J]. 水产科学, 2015, 34(10): 609-615.
Sun S, Li X S, Zhao W W, *et al.* Effects of temporal, spatial and environmental factors on distribution of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in 2013 based on generalized additive model[J]. Fisheries Science, 2015, 34(10): 609-615(in Chinese).
- [6] 朱国平, 刘子俊, 徐国栋, 等. 基于精细尺度的冬季南乔治亚岛南极磷虾渔获率时空与环境效应[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2397-3404.
Zhu G P, Liu Z J, Xu Y D, *et al.* Spatial-temporal and environmental effects of catch rate on Antarctic krill fishery in the South Georgia Island in the austral winter season based on the fine scale data[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(8): 2397-3404(in Chinese).
- [7] 周国法, 徐汝梅. 生物地理统计学 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
Zhou G F, Xu R M. Biogeostatistics[M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese).
- [8] 朱国平, 许柳雄. 热带大西洋西部水域大眼金枪鱼延绳钓渔场分布及其与表温之间的关系[J]. 海洋渔业, 2008, 30(1): 8-12.
Zhu G P, Xu L X. Hooking rates distribution of *Thunnus obesus* in tuna longlining ground and its relationship with SST in the western tropical Atlantic Ocean[J]. Marine Fisheries, 2008, 30(1): 8-12(in Chinese).
- [9] Mello L G S, Rose G A. Seasonal variation in abundance and stock composition of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) in Placentia Bay, Newfoundland, in relation to fisheries[J]. Fisheries Research, 2005, 74(1-3): 142-156.
- [10] 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 Z F, 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).
- [11] Roa-Ureta R, Niklitschek E. Biomass estimation from surveys with likelihood-based geostatistics[J]. ICES Journal of Marine Science, 2007, 64(9): 1723-1734.
- [12] 杨洋, 朱国平. 海洋渔业资源声学评估技术及在南极磷虾资源声学评估中的应用[J]. 海洋渔业, 2018, 40(3): 368-376.
Yang Y, Zhu G P. Assessment on marine living resources based on acoustic technology and its application in Antarctic krill abundance estimation[J]. Marine Fisheries, 2018, 40(3): 368-376(in Chinese).
- [13] 屈泰春, 陈帅, 黄洪亮, 等. 南极大磷虾声学调查数据噪声处理与资源密度评估[J]. 极地研究, 2014, 26(4): 451-459.
Qu T C, Chen S, Huang H L, *et al.* Removal of echo integration noise and estimation of the abundance of Antarctic krill[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2014, 26(4): 451-459(in Chinese).
- [14] 王新良, 赵宪勇, 汤勇, 等. 声学仪器间干扰信号的消除及其在南极磷虾集群研究中的应用[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(2): 22-29.
Wang X L, Zhao X Y, Tang Y, *et al.* Removal of the inter-instrument acoustic interference and its application in the study of Antarctic krill swarms[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(2): 22-29(in Chinese).
- [15] 屈泰春, 黄洪亮, 汤勇, 等. 渔业声学数据后处理中噪声剔除的研究进展[J]. 渔业信息与战略, 2013, 28(3): 208-213.
Qu T C, Huang H L, Tang Y, *et al.* Research progress on post-processing technique to remove noises in fishery acoustic data[J]. Fishery Information & Strategy, 2013, 28(3): 208-213(in Chinese).
- [16] SG-ASAM. Report of the fifth meeting of the subgroup on acoustic survey and analysis method[R]. Hobart, Australia: CCAMLR, 2010: 1-23.
- [17] Coetzee J. Use of a Shoal Analysis and Patch Estimation System (SHAPES) to characterise sardine schools[J]. Aquatic Living Resources, 2000, 13(1): 1-10.
- [18] Conti S G, Demer D A. Improved parameterization of the SDWBA for estimating krill target strength[J]. ICES Journal of Marine Science, 2006, 63(5): 928-935.
- [19] Higginbottom I, Woon S, Schneider P. Hydroacoustic data processing for standard stock assessment using echoview: technical manual[M]. Australia: Myriax Software Pty Ltd Publication, 2008: 1-108.
- [20] Garrigues S, Allard D, Baret F, *et al.* Quantifying spatial heterogeneity at the landscape scale using variogram models[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 103(1): 81-96.
- [21] Garrigues S, Allard D, Baret F, *et al.* Multivariate quantification of landscape spatial heterogeneity using variogram models[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(1): 216-230.
- [22] Johnston K, Ver Hoef J M, Krivoruchko K, *et al.* Using ArcGis geostatistical analyst[M]. Redlands, USA: ESRI Press, 2001.
- [23] 张仁铎. 空间变异理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Zhang R D. Spatial Variability theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese).
- [24] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用 [M]. 北京: 科

- 学出版社, 1999.
- Wang Z Q. Geostatistics and its application in ecology[M]. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese).
- [25] Palmer M W. Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities[J]. *Vegetatio*, 1988, 75(1-2): 91-102.
- [26] Carr J R, Benzer W B. On the practice of estimating fractal dimension[J]. *Mathematical Geology*, 1991, 23(7): 945-958.
- [27] 杨铭霞, 陈新军, 冯永玖, 等. 中小尺度下西北太平洋柔鱼资源丰度的空间变异[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6427-6435.
- Yang M X, Chen X J, Feng Y J, *et al.* Spatial variability of small and medium scales' resource abundance of *Ommastrephes bartramii* in Northwest Pacific[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(20): 6427-6435(in Chinese).
- [28] O'Brien D P. Description of escape responses of krill (Crustacea: Euphausiacea), with particular reference to swarming behavior and the size and proximity of the predator[J]. *Journal of Crustacean Biology*, 1987, 7(3): 449-457.
- [29] Klevjer T A, Tarling G A, Fielding S. Swarm characteristics of Antarctic krill *Euphausia superba* relative to the proximity of land during summer in the Scotia Sea[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2010, 409: 157-170.
- [30] Kalinowski J, Witek Z. Scheme for classifying aggregations of Antarctic krill[M]. Cambridge: Group of Specialist on Living Resources of the Southern Ocean Ecology, 1985: 1-12.
- [31] Tarling G A, Klevjer T, Fielding S, *et al.* Variability and predictability of Antarctic krill swarm structure[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(11): 1994-2012.
- [32] Krafft B A, Skaret G, Knutsen T, *et al.* Antarctic krill swarm characteristics in the Southeast Atlantic sector of the Southern Ocean[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, 465: 69-83.
- [33] 朱国平, 杨洋, 王芮, 等. 采用声学方法研究2016年秋季布兰斯菲尔德海峡南极磷虾群昼夜垂直移动特征及其影响因素[J]. *水产学报*, 2018, 42(10): 1541-1549.
- Zhu G P, Yang Y, Wang R, *et al.* Diel vertical migration of Antarctic krill (*Euphausia superba*) swarm in the Bransfield Strait during austral autumn 2016 inferred from acoustic data and its relations to environmental factors[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(10): 1541-1549(in Chinese).
- [34] 朱国平, 朱小艳, 夏辉, 等. 2011年夏秋季南奥克尼群岛水域南极磷虾集群时空分布[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(4): 912-919.
- Zhu G P, Zhu X Y, Xia H, *et al.* Spatiotemporal distribution patterns of Antarctic krill aggregations around the South Orkney Islands in austral summer-autumn 2011[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(4): 912-919(in Chinese).
- [35] 朱国平, 王芮, 朱小艳, 等. 2013年冬季南乔治亚岛南极磷虾群昼夜垂直移动研究[J]. *水产学报*, 2015, 39(8): 1243-1249.
- Zhu G P, Wang R, Zhu X Y, *et al.* Diel vertical migration of Antarctic krill aggregation in South Georgia Island in the austral winter season of 2013[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(8): 1243-1249(in Chinese).
- [36] Orsi A H, Nowlin Jr W D, Whitworth III T. On the circulation and stratification of the Weddell Gyre[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1993, 40(1): 169-203.
- [37] Palmer M, Gomis D, del Mar Flexas M, *et al.* Water mass pathways and transports over the South Scotia Ridge west of 50°W[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2012, 59: 8-24.
- [38] Locarnini R A, Whitworth T, Nowlin W D. The importance of the Scotia Sea on the outflow of Weddell Sea deep water[J]. *Journal of Marine Research*, 1993, 51(1): 135-153.
- [39] Garabato A C N, McDonagh E L, Stevens D P, *et al.* On the export of Antarctic bottom water from the Weddell Sea[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2002, 49(21): 4715-4742.
- [40] Murphy E J, Thorpe S E, Watkins J L, *et al.* Modeling the krill transport pathways in the Scotia Sea: spatial and environmental connections generating the seasonal distribution of krill[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, 51(12-13): 1435-1456.

Multi-scale analysis on spatial heterogeneity for abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the South Orkney Islands in summer 2018

WAN Shujie^{1,2}, ZHU Guoping^{1,2,3,4*}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Center for Polar Research, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Polar Marine Ecosystem Group, Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Antarctic krill (*Euphausia superba*) is a key species in the pelagic ecosystems of the Southern Ocean, and is also an important fishing target in China's distant-water fisheries. A full understanding of its spatial distribution characteristics can provide theoretical support for the sustainable exploitation and conservation of *E. superba* resources. Based on acoustic data collected by *E. superba* resource survey in the South Orkney Islands in summer 2018, the survey area was divided into 7 different spatial scales and the geo-statistical method was used to research the spatial heterogeneity of abundance of *E. superba* at different spatial scales. The result showed that: ① as the spatial scale increased, the nugget and nugget-sill ration gradually decreased, the partial sill and sill decreased first, then increased and went down again, and 40'×40' spatial scale had the biggest values; ② at different spatial scales, the semi-variogram was fitted by different models, spherical model had the best performance at 20'×20' and 50'×50' spatial scales, exponential model had the best performance at 10'×10' spatial scale, Gaussian model had the best performance at 30'×30', 40'×40' and 60'×60' spatial scales. And the fitted models showed the spatial auto-correlation was relatively strong; ③ the spatial structure of *E. superba* showed that, based on anisotropy, 50'×50' spatial scale had the minimum difference of fractal dimension values, 60'×60' spatial scale had the biggest difference of fractal dimension values. Based on isotropy, 60'×60' spatial scale had the minimum fractal dimension value, 50'×50' spatial scale had the biggest fractal dimension value. It is concluded that the abundance of *E. superba* in the South Orkney Islands had distinct spatial heterogeneity, a number of factors contributed to this phenomenon, including external factors such as ocean flow fields, the change of nutrient and thermocline caused by the exchange of water masses and internal factors such as behavior character of *E. superba*.

Key words: *Euphausia superba*; acoustics; geostatistical analysis; spatial scale; South Orkney Islands

Corresponding author: ZHU Guoping. E-mail: gpzhu@shou.edu.cn

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2018YFC1406801); National Natural Science Foundation of China (41776185); Antarctic Marine Living Resources Exploration and Utilization Project of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China (125C0505)