



基于变点分析的南极半岛南极磷虾资源 分布空间格局尺度效应

刘 慧^{1,2,3}, 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 210306)

摘要: 南极磷虾是南极生态系统的关键物种, 其资源分布具有显著的时空异质性。为了分析不同空间尺度对南极磷虾资源空间格局的影响, 实验利用 1996—2011 年南极半岛海域的南极磷虾生物量数据, 通过全局 Moran's I 、Geary's C 与 Ripley's K 函数对该资源的空间格局进行分析, 并对不同空间尺度下各空间指标进行变点检测。结果显示, 全局 Moran's I 值随着空间尺度的增大而降低, Geary's C 值先增大后降低。广义估计方程的结果显示, 空间尺度和距离均对 K 值有着显著的影响。研究表明, 南极半岛海域南极磷虾呈现高密度聚类分布, 但资源聚集程度随空间尺度的增加而减弱。基于多种检测方法的变点分析结果显示, $25' \times 25'$ 是多个空间指标发生质变的尺度, 可作为 $1' \times 1' \sim 60' \times 60'$ 尺度内此类研究开展比较分析的尺度阈。本研究探讨了南极磷虾资源空间分布的尺度效应, 为进一步开展区域性南极磷虾资源时空分布以及渔场形成机制研究提供科学依据。

关键词: 南极磷虾; 空间格局; 变点检测; 尺度效应

中图分类号: S 931

文献标志码: A

南极磷虾 (*Euphausia superba*) 属于磷虾科 (Euphausiidae) 磷虾属 (*Euphausia*), 为多年生大型甲壳类动物, 广泛分布于环南极陆架水域, 主要摄食浮游生物。南极磷虾因其丰富的资源量而成为南大洋生态系统中企鵝、海鸟、海豹等捕食者的重要食物来源, 在南大洋生态系统中起着关键作用^[1-2]。南极磷虾渔业是南大洋最重要的渔业形式^[3], 尽管目前该渔业因生态方面的考虑而受到限制, 但其仍具有巨大的潜力^[4]。南极磷虾资源分布的时空尺度问题对于确定其资源空间格

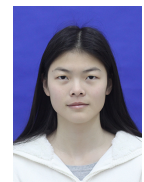
局以及开展资源评估至关重要^[5-6]。作为地理要素空间异质性的具体体现, 理解空间格局是开展资源评估、变化监测与预测分析的基础。空间格局具有尺度依赖性, 即尺度效应^[7-8]。因此, 尺度问题已成为目前地学和环境科学研究中的热点问题之一, 其对评估生态结构和生物多样性等科学问题的解决均有一定理论与实用价值^[9-10]。不少学者已注意到尺度对空间格局的影响, 因为不适宜的空间尺度可能会掩盖一些重要的空间与生态信息, 从而导致无法准确地阐明研究对象的空间格局^[11]。

收稿日期: 2021-12-21 修回日期: 2022-01-10

资助项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1406801); 国家自然科学基金 (41776185)

第一作者: 刘慧 (照片), 从事极地海洋生物学研究, E-mail: hui.liu_blue@foxmail.com

通信作者: 朱国平, 从事生物海洋学与海洋生物资源管理研究, E-mail: gpzhu@shou.edu.cn



因此,开展多尺度分析对于研究南极磷虾生态过程中空间格局的变化必不可少。

在研究南极磷虾资源分布和空间格局的过程中,学者采用了不同的空间尺度,如Cruz等^[5]考虑到渔业的作业规模,将南极磷虾渔业数据处理成9 km×9 km的网格。Perry等^[6]以2°×1°的尺度分析南极磷虾不同生命阶段的栖息地,并结合水深海温数据将栖息地进行划分。Atkinson等^[12]以9°×3°的尺度分析环南极的南极磷虾空间分布格局,并以1.0°×0.5°的尺度分析南极磷虾与叶绿素之间的联系。Murphy等^[13]研究了南极磷虾与环境及其他营养级之间相互作用的尺度,并开发了一套分析南极海洋生态系统的概念框架。Reid等^[14]通过计算不同距离下捕食者与南极磷虾的莫兰指数(Moran's I)确定了捕食者与南极磷虾分布的特征尺度。不同的空间尺度会给研究结果带来不同的影响,刘慧等^[15]通过Getis-Ord G_i^* 统计识别了南极磷虾资源分布的热(冷)点,并分析了南极磷虾热(冷)点和空间尺度之间的关系^[16]。但关于南极磷虾资源分布格局随着空间尺度的变化是否具平稳性尚未清晰。作为一种呈随机分布的集群性生物,目前尚未找到合适的方式明晰南极磷虾资源这种分布特征,尤其当其分布格局在尺度上发生变化时,这为该资源的评估带来了挑战。近年来,变点分析在生态学领域有着较好的应用,Patel等^[17]通过变点分析识别蠍龟的迁徙、觅食和越冬等行为模式,Nanninga等^[18]利用变点分析探究鱼类在存在观察者或者摄像机的环境中的适应期。为此,本实验通过多种变点分析方法,包括全局Moran's I 、Geary's C 与Ripley's K 函数等对不同空间尺度下南极磷虾资源分布格局进行研究,以期解决以下问题:①南极半岛海域南极磷虾资源分布空间格局;②不同空间尺度下南极磷虾资源分布的空间格局差异;空间尺度对于分析南极磷虾资源分布空间格局的影响;③南极磷虾空间状态随着空间尺度变化的平稳性,表征空间状态的指标在不同空间尺度下存在的变点。本研究有助于加深对空间尺度与南极磷虾空间格局之间关系的理解,并为同类研究的开展提供依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

数据来源于美国南极海洋生物资源项目

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

(AMLR, Antarctic Marine Living Resources)。基于声学手段,该项目于1996—2011年在南极半岛周围海域收集南极磷虾生物量密度数据。利用R语言以1'×1'为间隔将原始数据处理成1'×1'~1°×1°等60个空间尺度进行多尺度分析。

1.2 变点检测

通常建模和数据挖掘中的一个常见问题便是:如何根据现有数据判断感兴趣的统计量是否发生变化?变点检测即利用一定的统计指标或统计方法对序列数据的状态进行观测,以便准确地估计变点的位置。变点问题作为统计学中的一个重要课题,常常用于检测观测序列中的同质性,在工业质量控制、计算机、气象学、流行病学等多个领域均有广泛应用^[19-20]。为此,本实验利用Killick等^[21]研发的R语言changepoint包进行变点检测。changepoint包包含多种变点检测的方法,本实验基于数据的平均值和方差变化,通过PELT(pruned exact linear time)和AMOC(at most one change)检测变点。

1.3 空间指标

全局 Moran's I 全局 Moran's I 提出研究对象随机分布于研究区域的零假设,若 P 值($\alpha=0.05$)不具有统计学上的显著性,则不能拒绝零假设,表明 Moran's I 与零值之间无显著差异,所得研究对象的空间模式可能只是空间随机性的众多可能结果之一。若 Moran's I 为正,则指示研究对象的聚集趋势;反之,则指示离散趋势^[22]。Moran's I 的计算公式如下^[23-24]:

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

式中, x_i 为要素 i 的密度, \bar{x} 为平均值, w_{ij} 为要素 i 和要素 j 的空间权重, n 为要素总数,下同。

Geary's C 与 Moran's I 相似, Geary's C ^[25] 通过分析空间权重矩阵对地理空间中观测值之间的依赖程度衡量空间自相关。

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

Geary's C 产生一个由 0 至 2 的正值, $C = 1$ 表示无空间自相关, $C < 1$ 表示正向空间自相关,而 $C > 1$ 表示负向空间自相关。

Ripley's K 函数 基于 Ripley's K 函数的多

距离空间聚类分析是分析点数据空间模式的方法, 可用于探索性数据分析和关于空间状态的形式推断^[26-28]。该方法不同于其他方法, 可对一定距离范围内的空间相关性进行汇总。Ripley's K 函数可表明要素质心的空间聚集或空间离散在邻域大小发生变化时的变化:

$$K(r) = \frac{A \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij}}{n(n-1)} \quad (i \neq j)$$

式中, A 为面积大小, n 为要素的数目, r 为距离阈值, k_{ij} 为要素 i 和要素 j 的空间权重, 当 i 和 j 之间的距离小于或等于 r 时, k_{ij} 为 1, 当 i 和 j 之间的距离大于 r 时, k_{ij} 为 0。理论 K 曲线表示完全随机的点过程, 即 $K(r) = \pi \times r^2$ 。如果在特定距离范围内观察到的 K 值大于理论 K 值, 则指示在该距离范围内的分布比随机分布更聚类。相反, 如果观测到的 K 值小于理论 K 值, 则指示该距离范围内的分布比随机分布更分散。

利用 Kolmogorov-Smirnov 检验各尺度下的 K 值是否符合正态分布。若符合正态分布, 则采用 t 检验分析各空间尺度的 K 值是否存在显著差异; 若不符合正态分布, 则采用 Kruskal-Wallis 检验各空间尺度的 K 值是否存在显著差异。

2 结果

2.1 南极磷虾资源密度分布

1996—2011 年, 南极半岛海域共含 26220 个南极磷虾资源调查记录 (图 1), 其资源密度范围为 0~6499.7 g/m², 平均值为 10.6 g/m²。南极磷虾资源高密度的记录较少, 其中 75% 的南极磷虾资源密度处于 0~52.1 g/m²。以网格内所包含的南极磷虾资源平均密度作为该网格的密度, 绘制 10'×10'、20'×20'、30'×30'、40'×40'、50'×50'、60'×60' 空间尺度下南极磷虾资源密度分布情况。结果显示, 南极磷虾资源高密度主要分布在南设得兰群岛与象岛的北侧海域, 布兰斯菲尔德海峡的南极磷虾资源密度相对较高, 低密度主要出现在布兰斯菲尔德海峡的东侧, 即象岛的南侧海域, 以及远离南设得兰群岛的最北侧海域 (图 2)。整体来说, 越靠近沿岸, 南极磷虾资源密度越高。小尺度下, 南极磷虾资源密度的峰值较高, 当空间尺度越接近 60'×60', 高密度网格数量逐渐减少, 南极磷虾资源密度的最大值随着空间尺度的增大而降低, 但低密度 (0~1 g/m²) 网格始终存在。

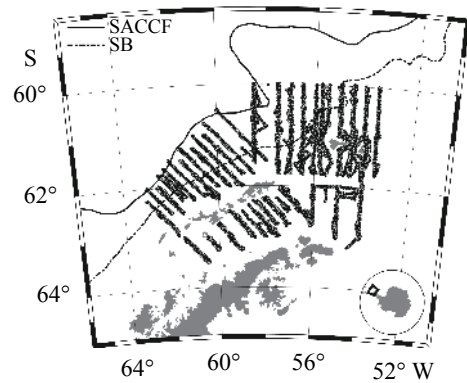


图 1 AMLR 计划南极磷虾资源调查断面

SACCF. 南极绕极流南锋; SB. 南极绕极流南端

Fig. 1 Stations of AMLR Antarctic krill resource survey
SACCF. Southern Antarctic Circumpolar Current Front; SB. Southern Boundary of Antarctic Circumpolar Current

2.2 全局 Moran's I

整个空间尺度范围, 全局 Moran's I 值的变化范围为 0.08~0.32, 表现出较大幅度的波动变化 (图 3)。各空间尺度下, Moran's I 值均大于 0, 表示南极磷虾在 1'×1'~1°×1° 空间尺度下均呈聚集状态。整体来说, 全局 Moran's I 的值随着空间尺度的增大而降低, 尺度越大, 南极磷虾越接近随机分布, 说明大尺度可能会掩盖一些信息。变点检测显示, 基于 PELT 方法的变点位置为 23'×23'、25'×25'、27'×27'、29'×29'、49'×49'、58'×58' (图 3-a), 基于 AMOC 方法的变点位置为 25'×25' (图 3-b)。

2.3 Geary's C

在各空间尺度下, Geary's C 值的范围为 0.66~0.99, 与全局 Moran's I 值相似的, 也表现出较大幅度的波动变化 (图 3)。在所有空间尺度下, Geary's C 值均小于 1, 表示南极磷虾在 1'×1'~1°×1° 空间尺度下均呈正向空间自相关。从整体上看, 在 1'×1'~50'×50' 时, 随着空间尺度的增大, Geary's C 值越接近 1, 南极磷虾资源分布的空间自相关越弱; 50'×50' 时, Geary's C 值突然下降。变点检测显示, 基于 PELT 方法的变点位置为 25'×25'、38'×38'、40'×40'、50'×50'、58'×58' (图 3-c), 基于 AMOC 方法的变点位置为 25'×25' (图 3-d)。

2.4 Ripley's K 函数

计算了 1'×1'~1°×1° 空间尺度下的 K 值后, 使用边界法或“减少样本”估计量^[28] 进行边缘矫正。考虑到检测各空间尺度下 Moran's I 、Geary's C 的变点时, 25'×25' 与 58'×58' 多次被检测为变点,

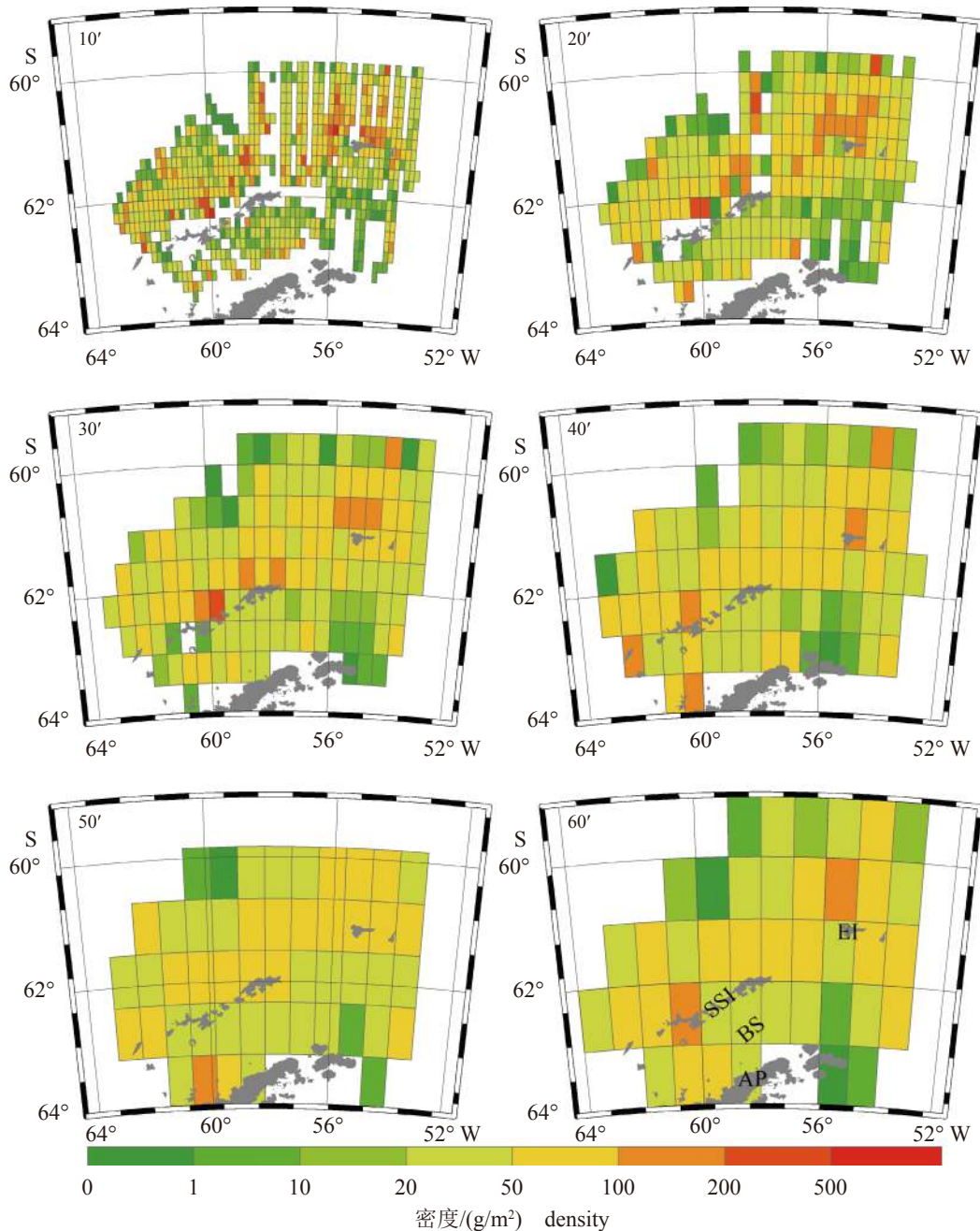


图 2 各空间尺度下南极半岛南极磷虾资源密度分布

AP. 南极半岛; BS. 布兰斯菲尔德海峡; SSI. 南设得兰群岛; EI. 象岛

Fig. 2 Distribution of Antarctic krill density around the Antarctic Peninsula at different spatial scales

AP. Antarctic Peninsula; BS. Bransfield Strait; SSI. South Shetland Islands; EI. Elephant Island

故为了便于分析, 图 4 中仅绘制了 25'×25' 与 58'×58' 空间尺度下的 K 值。Kruskal-Wallis 检验表明, 58'×58' 尺度下的 K 值与 25'×25' 存在显著差异 ($P < 0.01$)。

各空间尺度下的 K 值均随着距离 (r) 的增大而增大, 在 r 为 0 m 和 r 为 150000 m 时, 各空间尺度下的 K 值相差不大。空间尺度越大, K 值的阶跃变化越明显, 且阶跃变化的间距越长 (图 4)。

当 r 在 0~25000 m 时, 即空间范围较小时, 各空间尺度下的 K 值小于理论 K 值, 表明南极磷虾资源呈离散分布。当 $r > 120000$ m 时, 即空间范围较大时, 各空间尺度下的 K 值大于理论 K 值, 表明南极磷虾资源呈聚类分布。总体来看, 南极磷虾资源呈现聚类分布。

为分析空间尺度和距离对南极磷虾空间聚集性的影响, 利用广义估计方程 (generalized estimat-

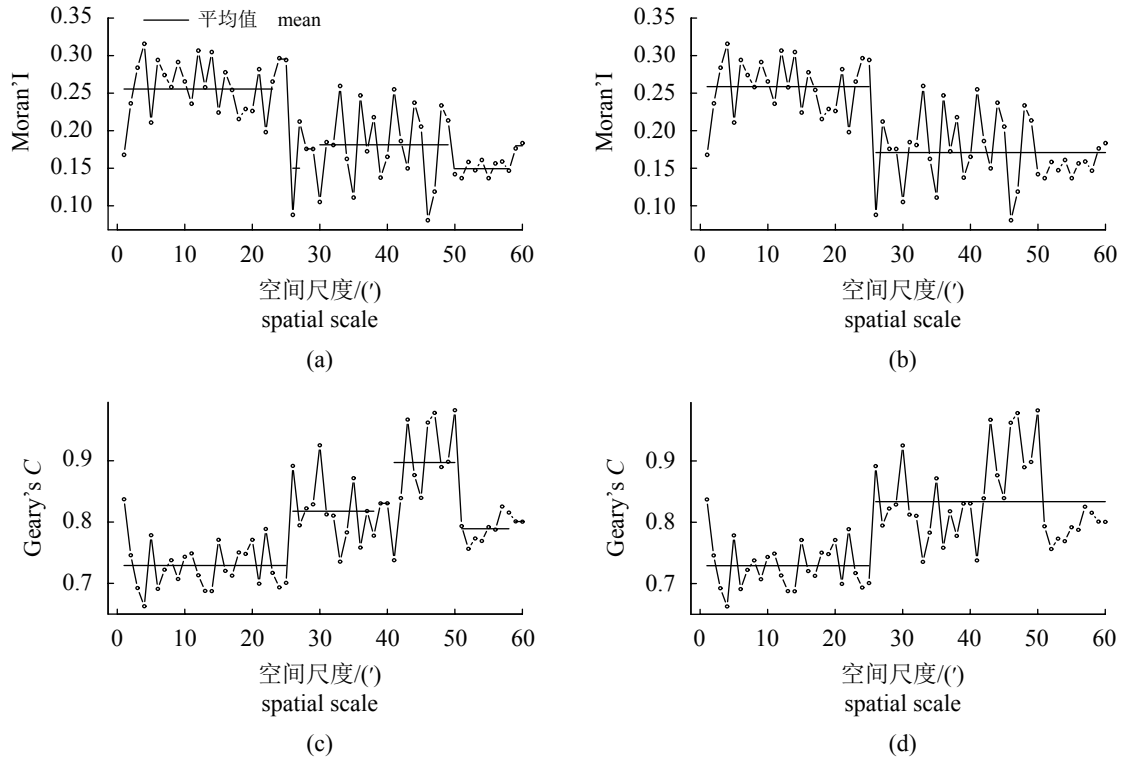


图 3 不同空间尺度下南极磷虾资源分布格局的空间指标

Fig. 3 Spatial index of krill resources distribution at different spatial scales

(a) (c) stand for PELT, (b) (d) stand for AMOC

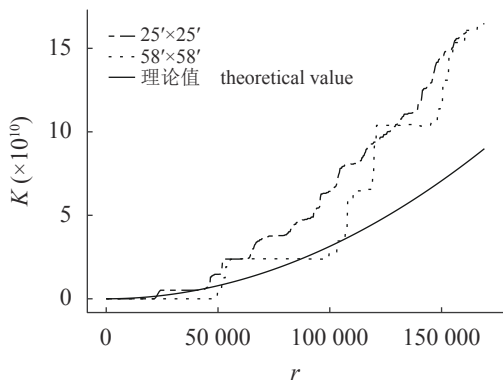


图 4 不同空间尺度下南极磷虾资源分布格局的 K 值
Fig. 4 K value of Antarctic krill resources distribution at different spatial scales

ing equation, GEE) 将实际 K 值与理论 K 值之差 (由 K' 表示) 作为因变量, 空间尺度和距离作为自变量进行模型构建。在构建模型前, 经检验空间尺度和距离的方差膨胀因子 (VIF) 均为 1, 表明空间尺度和距离无多重共线性关系。GEE 多因素分析结果显示, 空间尺度与 K' 呈负相关 ($P < 0.001$), 距离与 K' 呈正相关 ($P < 0.001$), 根据表 1 得出模型结果为:

$$K' = -1.41 \times 10^8 \times \text{scale} + 5.48 \times 10^5 \times r - 2.36 \times 10^3 \times \text{scale} \times r - 9.56 \times 10^9$$

3 讨论

3.1 南极磷虾资源分布空间格局

在 $1' \times 1' \sim 1^\circ \times 1^\circ$ 空间尺度下, 全局 Moran's I 表明南极磷虾资源呈现聚集分布状态, Geary's C 表明南极磷虾呈正向空间自相关性, Getis-Ord General G 表明高密度南极磷虾的聚集程度比预期要高, 其聚集程度随着空间尺度的变化存在波动。Ripley's K 的结果显示南极磷虾在大空间范围内

表 1 K' 值影响因素的广义估计方程参数

Tab. 1 Generalized estimation equation parameters of influencing factors of K' value

	回归系数 regression coefficient	标准差 standard deviation	P 值 P value
截距 intercept	-9.56×10^9	1.44×10^8	0.00
尺度 scale	-1.41×10^8	5.44×10^6	0.00
距离 r	5.48×10^5	1.73×10^3	0.00
交互项 interaction	-2.36×10^3	6.59	0.00

呈现聚集分布, 在小空间范围内南极磷虾呈现离散分布, 这与南极磷虾集群经常以斑块的形式^[29]出现有关。朱国平等^[30]通过对2011年夏秋季南奥克尼群岛海域南极磷虾的时空分布特征进行分析, 发现南极磷虾往往以高密度聚集, 块状南极磷虾群与带状南极磷虾群比例占主要优势, 散点状南极磷虾群所占比例最低。董思宋等^[31]基于布兰斯菲尔德海峡内采集的声学数据分析南极磷虾的集群结构, 结果发现, 2020年秋季南极磷虾数量随时间推移呈上升趋势, 带状和块状集群的面积和周长总体较为接近, 散点状集群规模最小, 长带状集群规模最大。考虑到南极磷虾资源密度具有显著的年际变化^[32]以及时空异质性, 而短时间序列内资源密度会显示出阶跃变化^[33], 此外, Fielding等^[34]还发现, 南极磷虾资源密度每4~5年会发生一次大的波动, 因此本研究采用的是1996—2011年期间的南极磷虾生物量密度数据, 以减弱南极磷虾资源的年际变化对其多空间尺度分析造成的影响。但AMLR计划的科学调查数据主要集中在1—3月, 此时正是南极磷虾的产卵期^[35], 而夏季海冰消退带来充足的食物来源。因此, 这种高密度聚集的现象可能与南极磷虾的摄食和产卵行为有关, 在其他季节南极磷虾的空间格局可能会有所不同。

3.2 尺度效应

分析由 $1' \times 1' \sim 1^\circ \times 1^\circ$ 空间尺度下的全局Moran's I 、Geary's C 与Ripley's K 函数的变化, 发现随着空间尺度的增大, 全局Moran's I 显示南极磷虾的聚集程度由强变弱, Geary's C 显示南极磷虾的空间正自相关性减弱, Ripley's K 显示南极磷虾呈离散分布的空间范围随着空间尺度的增大而扩大, 南极磷虾呈聚集分布的距离阈值 r 随着空间尺度的增大而增大。虽然各个空间指标表征的空间模式各异, 但上述空间指标随空间尺度的变化均表明空间尺度的大小对南极磷虾的空间聚集状态及聚集程度均会产生影响。空间尺度越小, 南极磷虾资源的聚集程度越高, 空间尺度越大, 南极磷虾的空间分布越可能受随机过程所驱动。南极磷虾通过集群的方式降低游泳的能量消耗, 同时方便摄食与交配^[36], 但潜在的寄生虫和疾病风险使得南极磷虾集群不可过大, 加上地形、海冰、海温与饵料条件的影响, 常常形成由几十米至数百千米不等的南极磷虾集群^[37]。万树杰等^[38]探究

了2018年夏季南奥克尼群岛海域南极磷虾的空间异质性, 发现与由随机因素引起的空间变异相比, 由南极磷虾自身空间结构引起的空间变异构成了总变异程度的主要部分, 在不同尺度下南极磷虾资源的空间状态更容易受自身空间结构因素的影响。当空间尺度较小时, 南极磷虾集群与环境能够被较好地地区分, 而当空间尺度较大时, 南极磷虾集群与环境被包含在同一个网格中, 南极磷虾集群被均一化, 从而减弱了南极磷虾集群本身的特性。空间范围(即距离 r)对南极磷虾的空间格局也会产生影响, Ripley's K 的结果显示南极磷虾在大空间范围内呈现聚集状态, 在小空间范围内南极磷虾呈现离散分布。基于GEE模型, 对 K' 值与空间尺度和距离的多因素分析显示, 距离对 K' 值的影响更大。本实验只针对 $1' \times 1' \sim 1^\circ \times 1^\circ$ 空间尺度下的南极磷虾空间格局进行了分析, 由 $1' \times 1' \sim 1^\circ \times 1^\circ$ 空间尺度下的尺度效应推测, 当空间尺度大于 $1^\circ \times 1^\circ$ 时存在南极磷虾资源呈完全的随机分布或离散分布的可能性。

3.3 尺度变点

变点检测可以确认所观察到的序列数据是同质还是异质^[39]。本研究中, 变点检测检验南极磷虾资源分布的空间格局随着空间尺度的变化是否具有稳定性。利用PELT和AMOC进行变点检测, 对于Moran's I 与Geary's C , AMOC方法检测出的变点均是PELT检测出的变点之一。AMOC方法假设序列数据中只存在一个变点, 而PELT方法则假设序列数据中存在多个变点。可以认为, AMOC方法检测出的变点为使得变点前后南极磷虾空间格局差异最大的空间尺度。在变点前, 南极磷虾的空间格局同质, 形成南极磷虾集群的驱动过程也较为类似, 比如饵料条件、海温状况、地形等。在变点后, 南极磷虾资源分布的空间格局虽然依旧呈聚集分布, 但渐渐趋向于随机分布, 其驱动过程与变点前相比发生了变化。基于AMOC方法检测出Moran's I 与Geary's C 的变点均为 $25' \times 25'$ 、 $25' \times 25'$, 在之前的研究中, 利用Moran's I 与空间尺度相关图确定的特征空间尺度之一为 $24.45' \times 24.45'$ 。特征空间尺度能够反映地理要素的自有特性及生物资源分布特征^[40], 而本实验所检测出的变点又多次出现 $25' \times 25'$ 。故本研究认为, $25' \times 25'$ 空间尺度前后, 南极磷虾资源分布的空间格局不同质, 且南极磷虾的空间格局在

不同的空间尺度下具有非平稳性。本研究建议对于采用了不同空间尺度分析南极磷虾资源分布的空间格局, 若空间尺度跨了 25'×25', 则不能将其研究结果进行比较, 如果采用了 1'×1'~25'×25' (或 26'×26'~60'×60') 之间的空间尺度分析南极磷虾资源的空间格局时, 相关研究结果之间可以进行比较, 但仍需考虑空间尺度效应。此外, 本实验仅针对南极半岛附近海域南极磷虾资源的空间格局开展了研究, 其广阔的陆架以及复杂的海流为南极磷虾提供了食物来源^[41], 有利于南极磷虾在南极半岛附近海域形成高密度集群, 在之前对环南极南极磷虾资源热点空间分布的研究^[14]中, 也发现相比较于其他海域, 南极磷虾资源热区在南极半岛海域的空间聚集时间较为持久。因此, 相关结果拓展到其他区域尚需要进一步验证。

感谢参与 AMLR 项目的科研人员在海上数据收集过程中所付出的辛勤劳动。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Nicol S, Endo Y. Krill fisheries: Development, management and ecosystem implications[J]. *Aquatic Living Resources*, 1999, 12(2): 105-120.
- [2] 陈洵子, 朱国平. 基于物种分布集成模型的布兰斯菲尔德海峡南极磷虾栖息地研究 [J]. 水产学报, 2022, 46(3):390-401 .
Chen X Z, Zhu G P. Habitat of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the Bransfield Strait based on ensembled species distribution model [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(3):390-401 (in Chinese).
- [3] Kawaguchi S, Nicol S. Learning about Antarctic krill from the fishery[J]. *Antarctic Science*, 2007, 19(2): 219-230.
- [4] Nicol S, Foster J. Recent trends in the fishery for Antarctic krill[J]. *Aquatic Living Resources*, 2003, 16(1): 42-45.
- [5] Cruz F S, Ernst B, Arata J A, *et al.* Spatial and temporal dynamics of the Antarctic krill fishery in fishing hotspots in the Bransfield Strait and South Shetland Islands[J]. *Fisheries Research*, 2018, 208: 157-166.
- [6] Perry F A, Atkinson A, Sailley S F, *et al.* Habitat partitioning in Antarctic krill: spawning hotspots and nursery areas[J]. *PLoS One*, 2019, 14(7): e0219325.
- [7] Turner M G, O'Neill R V, Gardner R H, *et al.* Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern[J]. *Landscape Ecology*, 1989, 3(3-4): 153-162.
- [8] Wiens J A. Spatial scaling in ecology[J]. *Functional Ecology*, 1989, 3(4): 385-397.
- [9] Lammert M, Allan J D. Assessing biotic integrity of streams: Effects of scale in measuring the influence of land use/cover and habitat structure on fish and macroinvertebrates[J]. *Environmental Management*, 1999, 23(2): 257-270.
- [10] Peterson G, Allen C R, Holling C S. Ecological resilience, biodiversity, and scale[J]. *Ecosystems*, 1998, 1(1): 6-18.
- [11] Feng Y J, Chen L J, Chen X J. The impact of spatial scale on local Moran's I clustering of annual fishing effort for *Dosidicus gigas* offshore Peru[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2019, 37(1): 330-343.
- [12] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E A, *et al.* Oceanic circumpolar habitats of Antarctic krill[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 362: 1-23.
- [13] Murphy E J, Morris D J, Watkins J L, *et al.* Scales of interaction between Antarctic krill and the environment[M]//Sahrhage D. Antarctic ocean and resources variability. Berlin, Heidelberg: Springer, 1988: 120-130.
- [14] Reid K, Sims M, White R W, *et al.* Spatial distribution of predator/prey interactions in the Scotia Sea: implications for measuring predator/fisheries overlap[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, 51(12-13): 1383-1396.
- [15] 刘慧, 朱国平. 近百年来南极磷虾分布冷热点的时空变动[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 1015-1022.
Liu H, Zhu G P. Spatial-temporal variation in hotspot and coldspot of Antarctic krill distribution in recent 100 years[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3): 1015-1022 (in Chinese).
- [16] 刘慧, 朱国平. 南极磷虾资源分布热点分析的空间尺度效应[J]. 水产学报, 2020, 44(11): 1851-1861.
Liu H, Zhu G P. Effect of spatial scale on hotspot analysis of Antarctic krill (*Euphausia superba*) distribution[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(11): 1851-1861 (in Chinese).

- 44(11): 1851-1861 (in Chinese).
- [17] Patel S H, Morreale S J, Panagopoulou A, *et al.* Change-point analysis: a new approach for revealing animal movements and behaviors from satellite telemetry data[J]. *Ecosphere*, 2015, 6(12): 1-13.
- [18] Nanninga G B, Côté I M, Beldade R, *et al.* Behavioural acclimation to cameras and observers in coral reef fishes[J]. *Ethology*, 2017, 123(10): 705-711.
- [19] Tseng Y H, Durbin P, Tzeng G H. Using a fuzzy piecewise regression analysis to predict the nonlinear time-series of turbulent flows with automatic change-point detection[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2001, 67(2): 81-106.
- [20] Patra K, Dey D K. A general class of change point and change curve modeling for life time data[J]. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 2002, 54(3): 517-530.
- [21] Killick R, Eckley I A. Changepoint: an R package for changepoint analysis[J]. *Journal of Statistical Software*, 2014, 58(3): 1-19.
- [22] Cliff A D, Ord J K. Spatial processes: models & applications[M]. London: Pion Ltd. , 1981.
- [23] Moran P A P. The interpretation of statistical maps[J]. *Journal of the Royal Statistical Society:Series B (Methodological)*, 1948, 10(2): 243-251.
- [24] Moran P A P. Notes on continuous stochastic phenomena[J]. *Biometrika*, 1950, 37(1-2): 17-23.
- [25] Geary R C. The contiguity ratio and statistical mapping[J]. *The Incorporated Statistician*, 1954, 5(3): 115-127,129-146.
- [26] Cressie N A C. Statistics for spatial data[M]. New York: John Wiley & Sons, 2015.
- [27] Ripley B D. Modelling spatial patterns[J]. *Journal of the Royal Statistical Society:Series B (Methodological)*, 1977, 39(2): 172-192.
- [28] Ripley B D. Statistical inference for spatial processes[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [29] Watkins J. Aggregation and vertical migration[M]//Everson I. Krill: Biology, Ecology and Fisheries. Oxford: Blackwell Science Ltd. , 2000: 80-102.
- [30] 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).
- [31] 董思宋, 孔群群, 朱国平. 2020年秋季南极布兰斯菲尔德海峡南极磷虾集群时空分布研究[J]. *水产学报*, 2022, 46(3):337-348.
- Dong S S, Kong Q Q, Zhu G P. Temporal and spatial distribution of Antarctic krill (*Euphausia superba*) swarms in the Bransfield Strait, Antarctic during autumn 2020[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(3): 337-348(in Chinese).
- [32] Brierley A S, Goss C, Grant S, *et al.* Significant intra-annual variability in krill distribution and abundance at South Georgia revealed by multiple acoustic surveys during 2000/01[J]. *CCAMLR Science*, 2002, 9: 71-82.
- [33] Brierley A S, Saunders R A, Bone D G, *et al.* Use of moored acoustic instruments to measure short-term variability in abundance of Antarctic krill[J]. *Limnology and Oceanography:Methods*, 2006, 4(2): 18-29.
- [34] Fielding S, Watkins J L, Trathan P N, *et al.* Interannual variability in Antarctic krill (*Euphausia superba*) density at South Georgia, Southern Ocean: 1997-2013[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2014, 71(9): 2578-2588.
- [35] 朱国平. 南极磷虾种群生物学研究进展II—繁殖[J]. *水生生物学报*, 2013, 37(4): 751-758.
- Zhu G P. Population biology of Antarctic krill *Euphausia superba* Dana. II—reproduction[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(4): 751-758 (in Chinese).
- [36] 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.
- [37] Kalinowski J, Witek Z. Scheme for classifying aggregations of Antarctic krill. BIOMASS hand-book no 27[R]. SCAR/SCOR/ABO/ACMRR, Group of Specialist on Living Resources of the Southern Ocean ecology, 1985.
- [38] 万树杰, 朱国平. 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[J]. *水产学报*, 2021, 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- 45(5): 716-725.
- Wan S J, Zhu G P. Multi-scale analysis on spatial heterogeneity for abundance of Antarctica krill (*Euphausia superba*) in the South Orkney Islands in summer 2018[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(5): 716-725 (in Chinese).
- [39] Ben Nasr I, Chebana F. Homogeneity testing of multivariate hydrological records, using multivariate copula L-moments[J]. *Advances in Water Resources*, 2019, 134: 103449.
- [40] Wu J G, Li H. Concepts of scale and scaling[M]//Wu J G, Jones K B, Li H, *et al.* Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology. Dordrecht: Springer, 2006.
- [41] Sokolov S, Rintoul S R. On the relationship between fronts of the Antarctic Circumpolar Current and surface chlorophyll concentrations in the Southern Ocean[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans, 2007, 112(C7): C07030.

Scale effect of spatial pattern for Antarctic krill (*Euphausia superba*) distribution around Antarctic Peninsula based on changepoint analysis

LIU Hui^{1,2,3}, 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 Laboratory, Ministry of Education Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

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

Abstract: As a key species in the Antarctic ecosystem, distribution of Antarctic krill (*Euphausia superba*) resources demonstrates significant spatial-temporal heterogeneity. Different spatial scales may give different results when analyzing the spatial pattern of Antarctic krill. In order to analyze the influence of different spatial scales on the spatial pattern of Antarctic krill, based on the biomass data of Antarctic krill in the waters near the Antarctic Peninsula from 1996 to 2011, Moran's *I*, Geary's *C* and Ripley's *K* value were calculated to analyze the spatial pattern of Antarctic krill resources, and to detect changepoints of various spatial indicators at different spatial scales. The results showed that the value of global Moran's *I* decreased as the increasing of spatial scales, the value of Geary's *C* increased but then decreased. The results of the generalized estimation equation showed that both spatial scale and distance had a significant impact on the *K'* value. In general, Antarctic krill around the Antarctic Peninsula had a high-density cluster distribution. and the aggregation degree of Antarctic krill around Antarctic Peninsula decreased with the increasing of the spatial scales. The changepoint detection showed that 25'×25' was the spatial scale where multiple spatial indicators qualitative change. Therefore, this study suggests 25'×25' can be considered as the scale threshold for comparing the results of such studies within the scale of 1'×1'~60'×60'. This study explored the scale effect of the spatial distribution of Antarctic krill resources, which can provide a scientific basis for further research on the spatial and temporal distribution of local krill resources and the formation mechanism of fishing grounds.

Key words: *Euphausia superba*; spatial pattern; changepoint detection; scale effects

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

Funding projects: National key R & D Project (2018YFC1406801); National Natural Science Foundation of China (41776185)