



基于空间自相关模型的南极半岛北部水域 南极磷虾渔场时空演变特征

赵国庆^{1,2}, 宋学锋², 徐博³, 杨嘉樑², 李帅²,
饶欣², 黄洪亮², 张衡^{2*}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部远洋与极地渔业创新重点实验室, 上海 200090;

3. 中国极地研究中心, 南极长城极地生态国家野外科学观测研究站, 上海 201209)

摘要: 南极磷虾是南极海域生态系统的关键物种, 是南极渔业的主要捕捞对象, 其渔场具有显著的时空分布特征。为明晰南极半岛北部水域磷虾渔场的变动情况, 本研究根据中国 2010—2020 年南极磷虾渔业统计资料, 运用全局 Moran's I 指数和热点分析对该水域磷虾渔场的时空分布特征进行了分析。结果显示, 南极半岛北部水域磷虾渔获量在空间分布上由分散演变为集中, 由南设得兰群岛 (South Shetland Islands, SSI) 北侧逐渐过渡到布兰斯菲尔德海峡 (Bransfield Strait, BS), 高值均沿陆地分布。单位捕捞努力量渔获量 (catch per unit effort, CPUE) 高值主要发生在 SSI 北侧和 BS 内靠近南极半岛一侧, 沿陆地分布。2010—2020 年南极半岛北部水域磷虾渔场呈显著空间聚集性, 2014、2015、2016、2018 和 2020 年的空间自相关性相对较弱。磷虾渔场分布的热点区和冷点区时空演变特征明显, 热点区由 SSI 北部逐渐向 BS 内迁移, SSI 北部逐渐由热点区变为冷点区, 而 BS 内逐渐由冷点区转变为热点区。

关键词: 南极磷虾; 空间自相关; Global Moran's I ; 热点分析; 南极半岛

中图分类号: S 931

文献标志码: A

南极磷虾 (*Euphausia superba*, 以下简称磷虾), 通常是指南极大磷虾, 广泛分布于南极大陆周围, 是南大洋生态系统物质循环和能量流动的关键环节^[1-2]。因其巨大的生物量^[3]和丰富的营养物质^[4-5], 磷虾一直以来都是南极海洋生物资源开发与利用的目标种。前苏联于 1962 年首次对磷虾进行了尝试性探捕活动, 并于 1972 年开始进行商业性捕捞^[6-7], 磷虾渔业自此进入了快速发展阶段。20 世纪 90 年代之前, 磷虾作业大多集中在印度

洋, 自 20 世纪 90 年代初开始逐渐向西南大西洋转移, 目前主要集中在南设得兰群岛 (South Shetland Islands, SSI)、南乔治亚群岛和南奥克尼群岛^[8-10], 其中布兰斯菲尔德海峡 (Bransfield Strait, BS) 取代德雷克海峡成为了主要的捕捞热点海域^[11]。

随着全球气候变暖, 南极海域秋冬季延迟, 南极半岛周围海域的海冰无法按时成型, 无冰区域进一步扩大^[12], 从而导致磷虾捕捞的时间跨度变得越长, 曾只在夏季的捕捞活动现已持续

收稿日期: 2021-08-31 修回日期: 2022-02-18

资助项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1406802)

第一作者: 赵国庆 (照片), 从事渔业遥感研究, E-mail: zqg617717@163.com

通信作者: 张衡, 从事渔业遥感研究, E-mail: zhangzhiqian0601@163.com



到秋季^[13]。南极海洋生物资源养护委员会 (Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR) 规定联合国粮农组织 (FAO) 48.1 亚区磷虾的捕捞限额为 15.5 万 t, 据报道, 目前已多次达到触发水平^[10]。磷虾渔业管理的主要目标之一是避免因为磷虾资源的枯竭而对以磷虾为中心的生态系统产生潜在的不利影响^[14-15], 目前由于缺乏最新的磷虾资源量评估^[15], 因此无法准确获知人类捕捞和捕食者之间竞争关系的程度, 但据研究, 二者之间存在较大的竞争关系^[10,16]。磷虾渔场的时空转移、渔船捕捞地点的高度集中、磷虾渔季的延长以及捕捞产量的增长等, 促使人们开始思考人类的捕捞活动是否已经对当地的生态系统产生了不利的影响^[17]。因此, 磷虾渔场的时空变动作为磷虾渔业的具体体现, 得到了国内外诸多学者的重视。赵国庆等^[18]基于渔业数据, 采用重心迁移轨迹模型和标准差椭圆模型对 48 渔区 (FAO) 磷虾渔场的分布特点进行了研究。张瑛瑛等^[19]则分析了磷虾 CPUE 的变化情况, 并探讨了环境因素对磷虾渔场变动的影响。Arana 等^[20]基于智利的生产数据, 对磷虾的产量和 CPUE 的变化以及磷虾渔场的转移情况等进行了研究。Cruz 等^[11]分析了 BS 内磷虾的捕捞生产情况, 确定了磷虾的捕捞热点, 对其渔场变动情况进行了深入分析。

渔场变动是时间和空间相互作用的结果, 地理上的空间分析方法对分析渔场变动具有较大优势^[21]。而全局莫兰指数和局部热点分析作为空间自相关分析的有效方法, 可以较好地展示变量的全局分布特征和局部具有统计显著性的热点和冷点, 对探讨渔场变动特征具有较好效果^[21-22]。而热点分析也已被成功应用于南极磷虾研究当中, 如刘慧等^[23-24]利用热点分析分别对近百年来南极磷虾分布冷热点的时空变动以及空间尺度效应进行了分析。基于此, 本研究利用 2010—2020 年中国的捕捞数据, 运用空间自相关方法, 对磷虾渔场的变动进行了深入分析, 以期为当前磷虾渔场研究提供思路, 并为磷虾渔业的发展提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源及捕捞海域

磷虾渔业数据来源于中国磷虾捕捞生产渔船 (中国水产总公司、上海开创远洋渔业公司、辽宁

远洋渔业公司等 11 艘渔船) 的统计资料 (图 1), 数据包括作业日期 (年、月、日)、作业位置 (经度和纬度)、渔获产量、拖网次数、拖网时间、拖速、网具类型、拖网作业时的网口高度和网口水平扩张。时间跨度为 2010—2020 年, 统计的作业区域为 60°~66°S, 54°~64°W (图 2)。刘慧等^[25]研究指出, 南极半岛海域磷虾资源分布研究的最适空间尺度为 15'×15', 因此本研究在进行产量、CPUE 分布分析时将经纬度 15'×15' 定义为一个小区, 并以放网位置作为统计标准, 统计每个小区的产量之和、CPUE 来进行空间分布研究。同时, 为兼顾每个捕捞点对渔场的贡献, 在进行空间自相关研究时将产量的点要素作为输入变量。

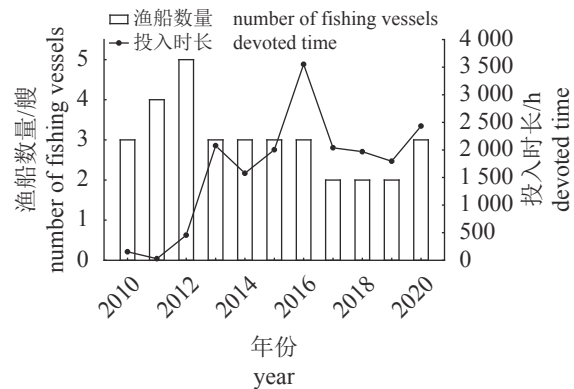


图 1 南极磷虾拖网渔船数量和拖网次数统计图

Fig. 1 Statistics of *E. superba* trawlers and trawling times

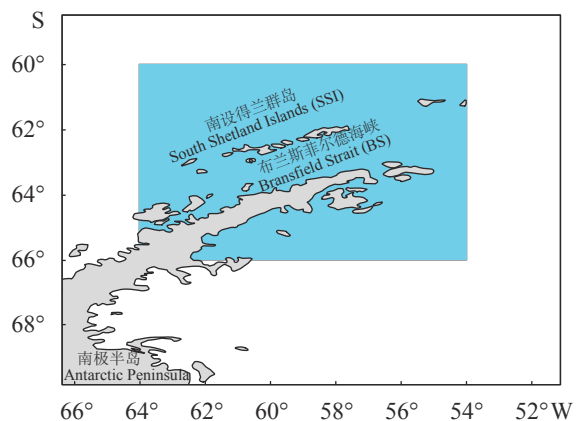


图 2 调查海域示意图

Fig. 2 Sketch map of investigation area

1.2 渔获数据处理

虽然使用 CPUE 来表示磷虾的资源丰度一直颇有争议, 有效性也存在着较大的不确定性^[26],

但简单的 CPUE 指数仍被认为是预测其丰度的有效工具^[27]。因此, 目前在没有更合适的指数来表示磷虾丰度的情况下, 本研究采用标准化后的 CPUE 来表征磷虾渔场资源丰度和渔船的捕捞效率, 单位为 t/h, 计算公式:

$$\text{CPUE}_k = \frac{C}{E} \quad (1)$$

$$\text{CPUE} = \text{CPUE}_k \times [W_A \times H_A \times S_A / (W_k \times H_k \times S_k)] \quad (2)$$

式中, CPUE_k 为各捕捞渔船的名义 CPUE; C 为 $15' \times 15'$ 单位渔区内的渔获量 (t); E 为 $15' \times 15'$ 单位渔区内的网具作业时间 (h); W_A 、 H_A 和 S_A 分别为标准渔船的网口水平扩张 (m)、网口高度 (m) 和拖网速度 (kn); W_k 、 H_k 和 S_k 分别为 k 类船的网口水平扩张、网口高度和拖网速度。本研究中, 使用“832 型”网具的渔船较多 (占比约 50%)、作业时间较长且作业网次比例高 (占比约 30%), 因此选其为标准渔船进行 CPUE 标准化, 选取办法和标准参照 Zhang 等^[28]。同时, 将时间作为控制变量, 利用偏相关分析对产量和 CPUE 进行相关性分析。另外, 利用单因素方差分析对不同年份的磷虾产量和 CPUE 进行显著性检验, 均以 0.05 作为差异显著水平。

1.3 全局空间自相关

全局空间自相关是对地理属性要素值在整个区域的空间特征描述, 用来度量整个研究区域内空间对象之间的关联程度, 以表明空间对象之间是否存在显著的空间分布模式, 通常采用全局 Moran's I 指数、全局 Gear's C 和全局 Getis-Ord G^* 等统计量来进行分析^[29]。本研究采用全局 Moran's I 指数来度量磷虾产量在空间上的全局自相关程度, 并利用标准化 Z 值检验全局 Moran's I 指数的显著水平, 计算公式^[30]:

$$I = n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

$$Z_{\text{score}} = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{VAR}(I)}} \quad (4)$$

式中, n 为研究单元总个数; x_i 、 x_j 分别为第 i 、 j 个研究区域磷虾产量; w_{ij} 为 i 、 j 区域的空间权重系数, 它反映第 i 、 j 区域在空间上的关系, 并定

义: 若区域相邻, $w_{ij}=1$, 否则, $w_{ij}=0$; \bar{x} 为产量均值; $E(I)$ 、 $\text{VAR}(I)$ 分别表示 Moran's I 的期望值和方差。全局 Moran's I 指数取值范围为 $[-1, 1]$, 定义为 Moran's $I > 0$ ($P < 0.05$), 表示存在空间正相关, 即产量高值 (或低值) 在空间上显著聚集; Moran's $I = 0$ 或接近 0, 表示相邻区域不存在空间自相关性, 产量随机分布; Moran's $I < 0$ ($P < 0.05$), 表示空间负相关, 即相邻区域的产量不具相关性。在显著性为 0.05 水平下, $|Z_{\text{score}}| > 1.96$, 则表明全局 Moran's I 指数显著。

1.4 局部空间自相关

全局空间自相关描述了整个研究区域属性分布的自相关程度, 但不能有效表达研究区域内不同空间单元与邻近区域在空间上的自相关水平。局部空间自相关——Getis-Ord G_i^* 方法 (热点分析) 能够揭示局部区域属性的空间集聚特征, 识别具有统计显著性的高值 (热点) 和低值 (冷点) 的空间聚类, 以计算磷虾渔场产量的高值 (或低值) 在空间上聚类的位置, Getis-Ord G_i^* 计算公式^[31]:

$$G_i^* = \frac{\left(\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) / \sqrt{n \left(\sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} \right)^2 \right) / (n-1)}}{\quad} \quad (5)$$

式中, x_j 为要素 j 的属性值; $w_{i,j}$ 表示要素 i 和 j 之间的空间权重 (相邻为 1, 不相邻为 0); n 为样本点总数。统计结果为 Z 得分, Z 得分为正且显著, 则表示热点, 值越大热点聚集越紧密; Z 得分为负且显著, 则表示冷点, 值越小冷点聚集越紧密^[32]。根据 Getis-Ord G_i^* 的高低及显著性水平, 结合 ArcGIS 中自然间断点分级法将渔获量区域分为 5 类: 冷点区、次级冷点区、随机分布区、次级热点区和热点区。

2 结果

2.1 磷虾产量和 CPUE

2010—2020 年, 南极半岛北部水域磷虾产量呈现逐年震荡上升趋势, 自 2013 年起上升幅度较大, 2016 年达到最大值。CPUE 呈现波浪变动趋势, 具有两个峰值, 分别发生在 2014 和 2019 年, 最小值发生在 2012 年, CPUE 变动范围为 8.58—20.06 t/h (图 3)。

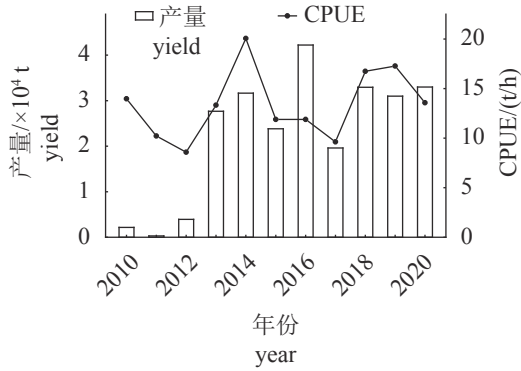


图 3 2010—2020 年南极半岛北部水域磷虾产量和 CPUE

Fig. 3 Yield and CPUE of *E. superba* of northern waters of the Antarctic Peninsula from 2010 to 2020

南极半岛北部水域磷虾产量和 CPUE 时空变化如图 4、图 5 所示。统计年间, 磷虾产量分布趋势由分散演变为集中, 由 SSI 北侧逐渐过渡到 BS 内, 到 2020 年产量几乎全部集中在 BS。产量分布范围的年间变动较小, 高值均沿陆地分布 (图 4); 高值点周围一般均由高值点组成, 而低值点较为分散。CPUE 的高值主要沿陆地分布, 主要发生在 SSI 北侧和 BS 内靠近南极半岛一侧; CPUE 高值占比年间变动较大, 总体上, 高值点较集中, 低值点较分散 (图 5)。利用偏相关分析对产量和 CPUE 进行相关性分析, 结果表明产量和 CPUE 存在显著的正相关性 (偏相关系数为

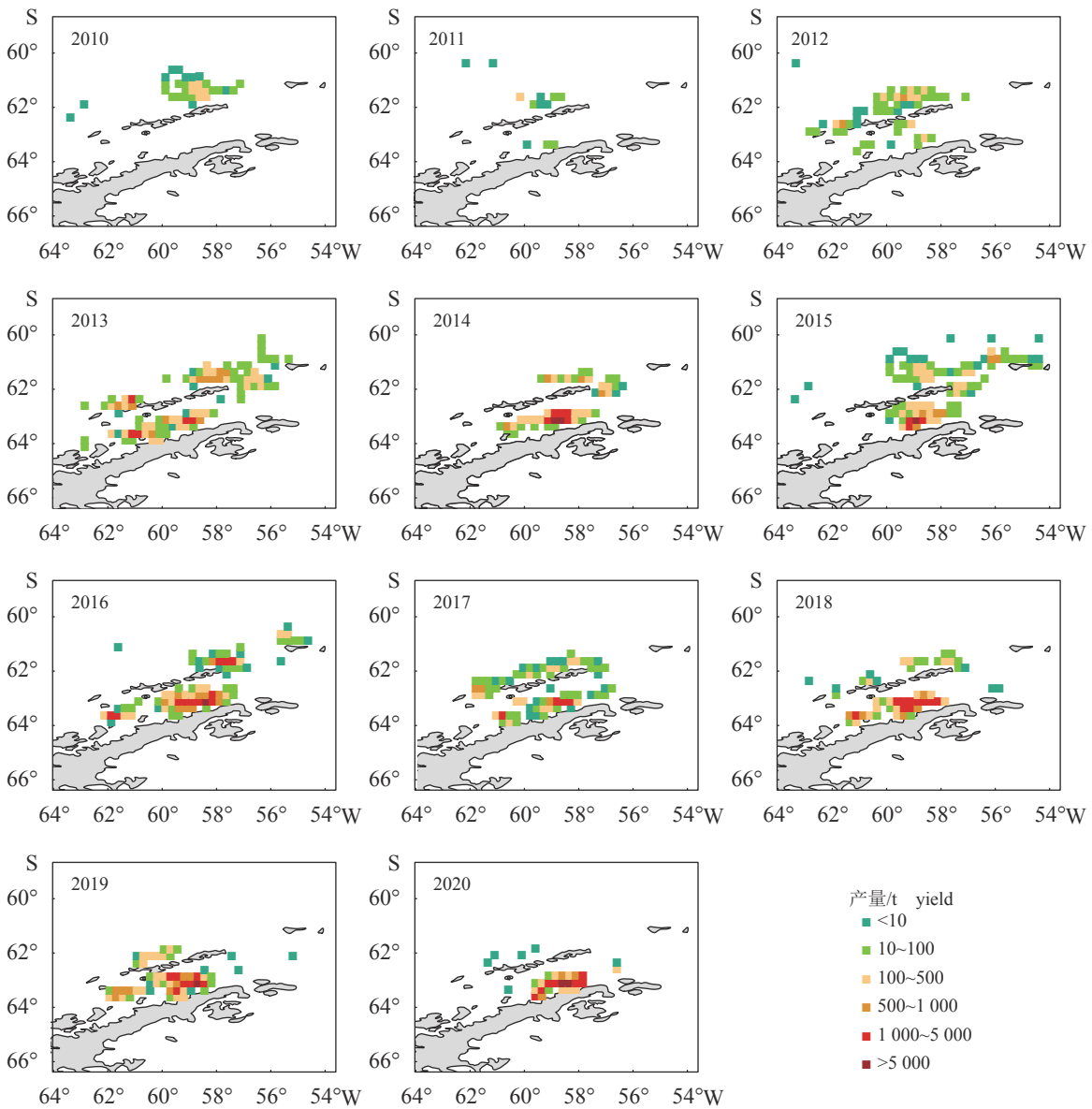


图 4 2010—2020 年磷虾产量时空变化

Fig. 4 Inter-annual space-time variation of yield of *E. superba* from 2010 to 2020

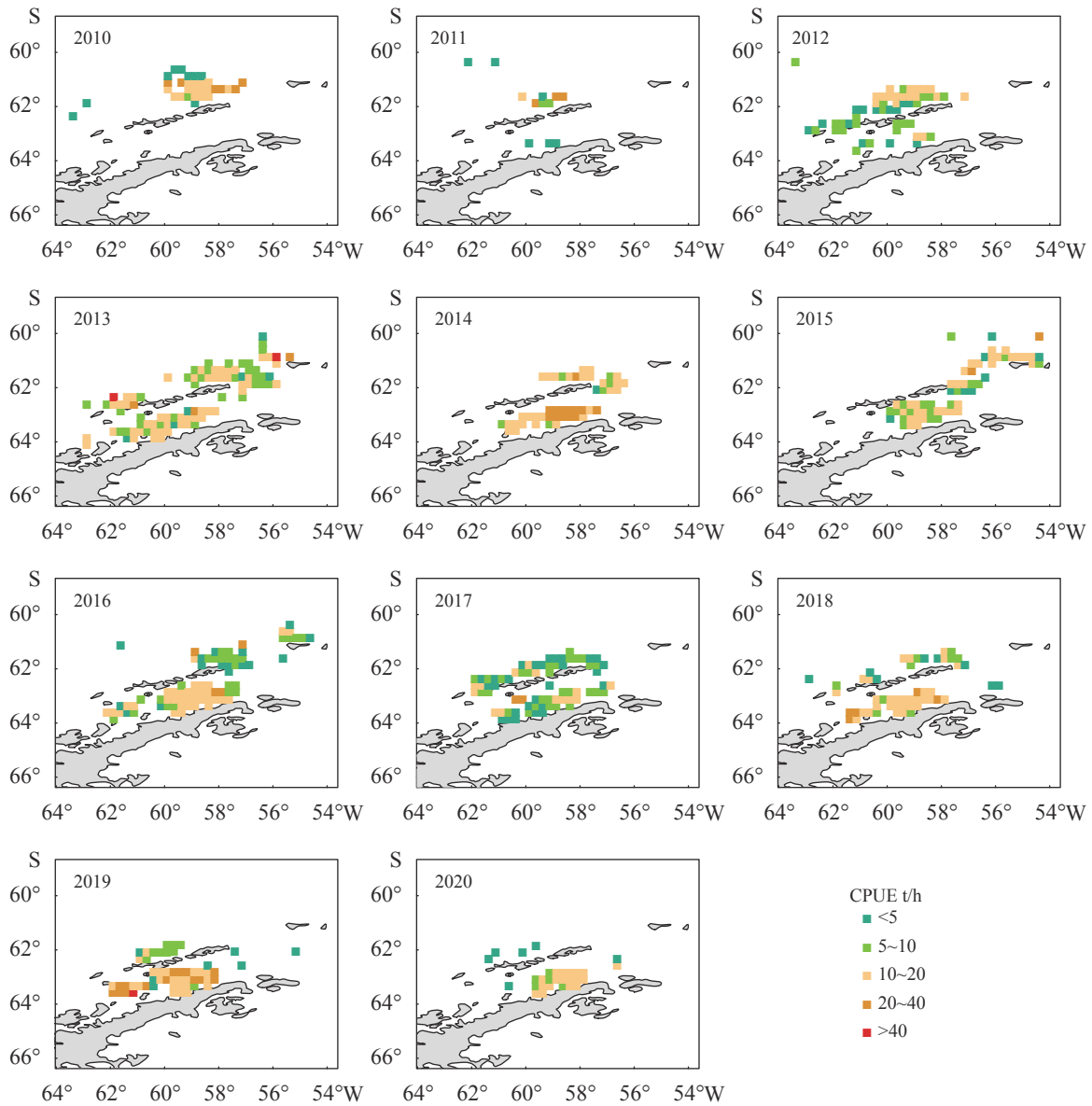


图5 2010—2020年磷虾CPUE时空变化

Fig. 5 Inter-annual space-time variation of CPUE of *E. superba* from 2010 to 2020

0.646, $P < 0.05$)。而年间产量和CPUE的差异均显著 ($P < 0.05$)。

2.2 磷虾渔场空间聚集性

结果显示,所有年份偏态 Sk 均在 $-0.5 \sim 0.5$ 范围外,且2014、2017和2020年的 $Sk > 1$,表明年间各区域磷虾产量的分布呈中等和高等偏态,偏斜程度较高;2010、2011和2015年的峰度 $K < 0$,表明此三年各区域磷虾产量为扁平分布,产量分布比较分散,其他年份的 K 值均大于0,因此其他年份各区域磷虾产量的分布为尖峰分布,产量分布较为集中;各年变异系数 Cv 为 $0 \sim 1$,表明各区域年间渔获量差异中等; $SD^2/mean > 1$,表明年

间各区域磷虾渔获量呈强烈聚集分布(表1)。2010—2020年南极半岛北部水域各区域磷虾产量的全局莫兰指数均为正值,为 $0.041 \sim 0.665$, Z 得分均大于1.96,且 $P < 0.05$,表明各年份磷虾产量均具有显著的空间聚集性,并非随机分布,但是2014、2015、2016、2018和2020年Global Moran's $I < 0.1$,因此这些年份的空间自相关性相对较弱。

2.3 磷虾渔场局域空间分布格局

对2010—2020年南极半岛北部水域磷虾渔获量空间格局热点演化情况进行分析,发现磷虾渔获量分布的热点区和冷点区表现出一定空间演变特征(图6),不同年份的热点区和冷点区的分布

表 1 磷虾渔获量年间全局空间自相关参数及常规参数统计

Tab. 1 Global spatial autocorrelation parameters and ordinary statistics for the annual catch of *E. superba*

年份 year	均值 mean	标准差 SD	偏态(<i>Sk</i>) skewness	峰度(<i>K</i>) kurtosis	变异系数 <i>C_v</i>	<i>SD</i> ² /mean	Global Moran's <i>I</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>
2010	12.235	6.063	-0.518	-0.733	0.496	3.004	0.320	8.856	0.000
2011	9.700	8.926	0.578	-1.431	0.920	8.213	0.665	6.427	0.000
2012	11.313	6.985	0.846	1.053	0.617	4.313	0.313	2.633	0.008
2013	13.211	6.859	0.625	0.230	0.519	3.561	0.164	9.033	0.000
2014	16.889	8.211	1.570	7.428	0.486	3.992	0.079	6.277	0.000
2015	14.990	7.926	0.384	-0.213	0.529	4.191	0.041	11.988	0.000
2016	17.559	11.496	0.974	0.641	0.655	7.527	0.045	13.388	0.000
2017	13.664	10.645	1.309	2.169	0.779	8.293	0.114	17.949	0.000
2018	15.196	8.564	0.958	0.983	0.564	4.826	0.035	15.444	0.000
2019	17.280	8.993	0.885	0.791	0.520	4.681	0.139	39.452	0.000
2020	15.279	8.807	1.147	1.512	0.576	5.076	0.071	10.432	0.000

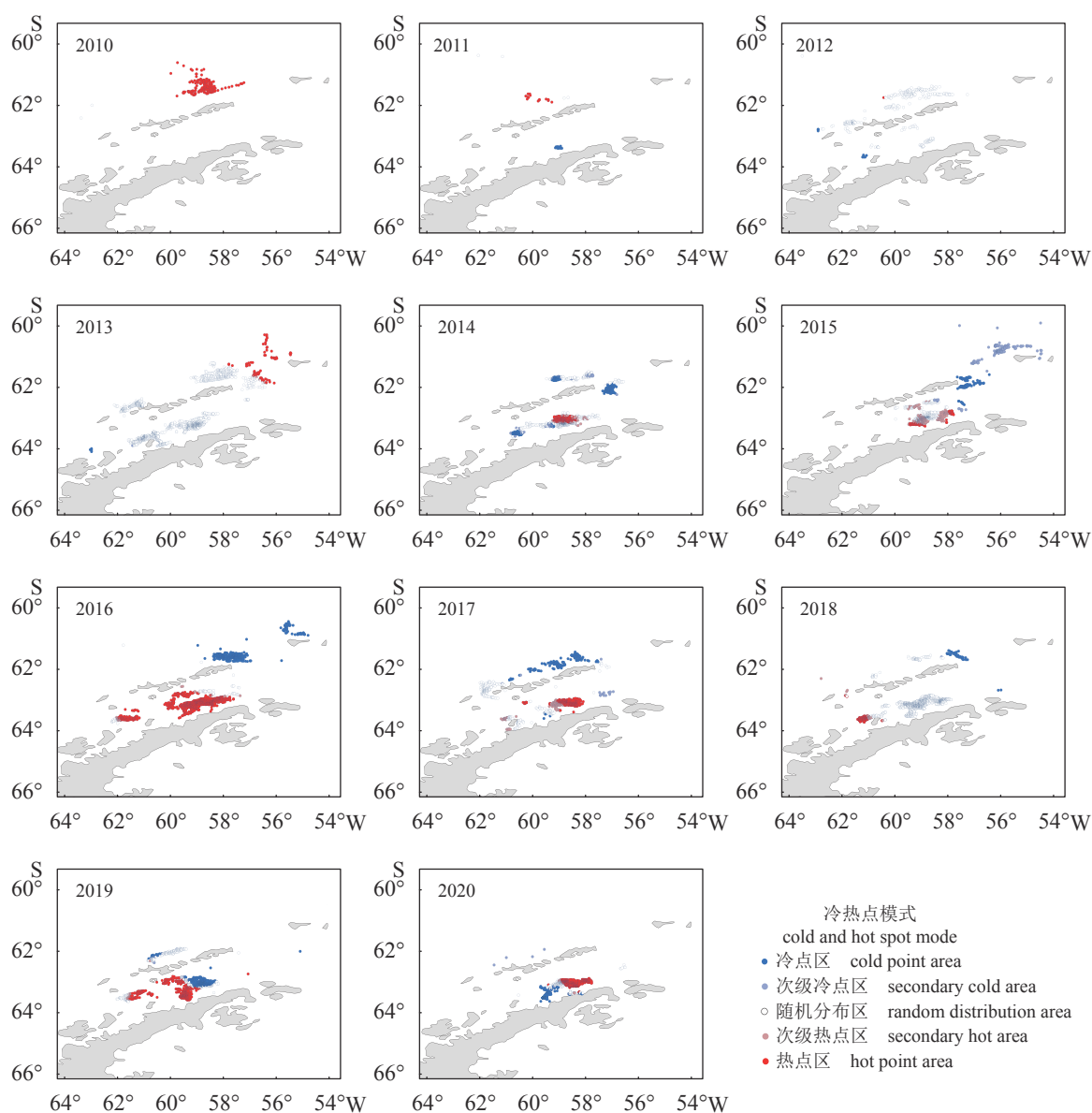


图 6 南极半岛北部水域磷虾年间热点分析

Fig. 6 Hotspots of annual catch of *E. superba* in northern waters of the Antarctic Peninsula

区域、面积、占比等均存在较大差异,热点区由SSI北部逐渐向BS内迁移,SSI北部逐渐由热点区变为冷点区,而BS内逐渐由冷点区转变为热点区。具体来看,2012、2013和2018年具有较弱的冷热点特征,大部分区域为随机分布区,冷点和热点占比均较少,其他年份均具有明显的冷热点特征;除2015年外,其他年份的次级冷点区和次级热点区均占有较小比例;2014、2015、2016、2017、2019和2020年的热点全部位于布兰斯菲尔德海峡内,而冷点的分布范围相对较广,主要分布在SSI北侧和布兰斯菲尔德海峡内。

3 讨论

3.1 磷虾资源的分布、丰度和产量分析

磷虾资源分布和丰度的长期变化受气候、人为捕捞、捕食者的活动等多重影响,磷虾的季节性分布、资源量变化、丰度等内容越来越受到人们的重视,但是一直以来对其多有分歧^[1]。Mackintosh^[33]认为,磷虾主要分布在南极大陆周围约 $19 \times 10^6 \text{ km}^2$ 范围内。而对于磷虾分布的密集区,则多认为出现在陆架边缘、斜坡、岛屿周围和冰架边缘^[34]。Reiss等^[34]基于滑翔机结合渔获数据对南极半岛北部的磷虾丰度进行了分析,得出BS内的磷虾丰度较其他地方要高。另外,磷虾丰度

年间差异较大,Fielding等^[35]指出,南乔治亚岛周围的磷虾丰度每4~5年波动一次,而这种变化与洋流和海洋滞后指数存在较大关系。

纵观磷虾渔业发展史,自1973年磷虾被商业性开发以来,磷虾渔业主要集中在南大西洋,即南极48渔区,而且48.1亚区作为主要捕捞海域占有较大比例(图7)^[9,33]。本研究发现,作为48.1亚区主要渔场的南极半岛北部水域磷虾产量分布的年间波动较大,于2011年开始逐渐向北迁往BS海域内,由分散演变为集中,且产量高值基本沿陆地分布,Arana等^[20]对2011—2016年智利的磷虾渔业进行分析后也得出了同样的结果。各种因素促成了捕捞努力量逐渐向BS特定区域集中,这些因素主要包括管制处置(例如国际条例、南乔治亚岛的许可证费用)、环境(例如不断变化的海冰状况、天气状况)、经济(例如补贴、作业船只捕捞费用、探捕和加工处理费用)、船队动态(例如负责任的磷虾捕捞公司协会自愿关闭政策、船只合作、船长的经验),以及在恶劣天气条件下可利用的躲避风险的地点^[20]。本研究发现在地理分布上,磷虾CPUE与其产量的大小变化具有较高的一致性,CPUE高值主要发生在SSI北侧和BS内靠近南极半岛一侧,沿陆地分布。产量和CPUE变化的一致性表明捕捞渔船与磷虾群高度一致的

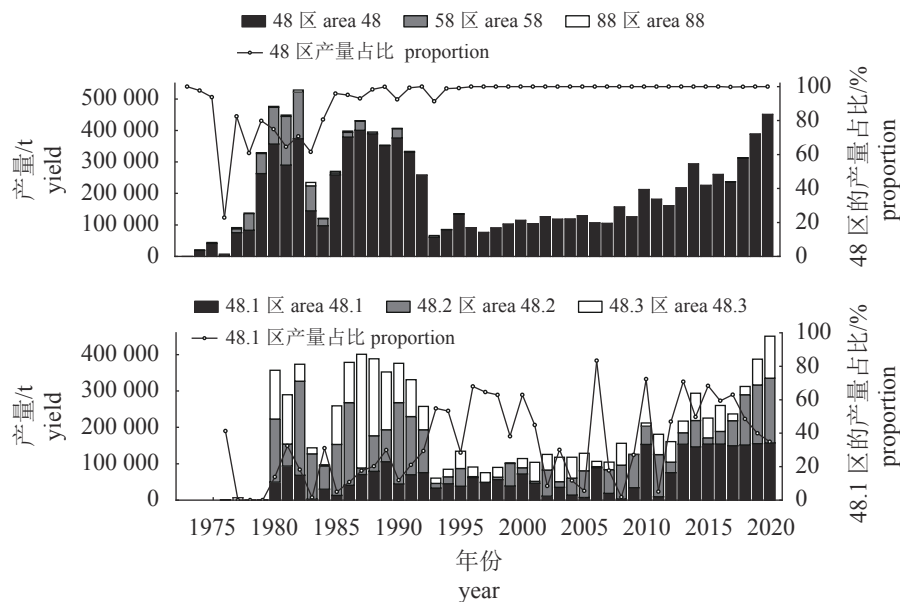


图7 CAMLR公约区内南极磷虾的年渔获量

图中所用捕捞数据来源于CCAMLR网站(<https://www.ccamlr.org/en>)

Fig. 7 Annual catches of *E. superba* in the CAMLR Convention Area

The fishing data were from the official website of CCAMLR

活动路线, 因为我国目前的磷虾捕捞采用瞄准式中层拖网捕捞方式, 从而也体现出了目前磷虾捕捞技术的先进性。但是这也引出了另外一个热点问题, 即 BS 作为磷虾重要的产卵场和育幼场, 是多种海洋动物的捕食地点^[36-38], 而人类捕捞活动的增强、过度集中以及捕捞技术的进步可能会破坏这种捕食关系, 从而对该海域的生态产生不利的影响。

3.2 磷虾渔场变动的空间自相关分析

2010—2020 年南极半岛北部水域磷虾渔场的集聚程度存在不同程度的差异, 各年的 Moran's *I* 指数差别较大, 大值超过 0.5, 而小值却小于 0.1, 说明年间磷虾空间分布的集聚程度有强有弱, 且差别较大。南极半岛北部水域的热点主要由 SSI 北部向 BS 迁移, SSI 北部逐渐由热点区变为冷点区, 而 BS 内逐渐由冷点区转变为热点区, 但是共同点是热点均沿陆地分布, 这也反映出了磷虾分布的密集区常出现在陆架边缘、斜坡、岛屿周围和冰架边缘^[34]的结论。另外, 不管是冷点、热点还是随机分布区, 均各自表现出较为明显的空间聚集性, 呈团块状分布, 符合水生态系统研究中普遍存在的球形半方差函数的特征, 即当样点间隔距离达到变程之前, 样点的空间依赖性随样点的距离增大而逐渐降低^[39]。南大洋环境的持续变化可能已经导致磷虾栖息地质量下降, 近年来, 随着气候逐渐变暖, 无冰区域进一步扩大, 磷虾栖息地范围进一步萎缩^[40], 导致磷虾渔场进一步向南极大陆靠近, 也很好解释了热点区域往 BS 内迁移的现象。Cruz 等^[11]通过研究南极半岛西部热点捕捞区域后发现, 捕捞船队和捕捞热点逐渐向南扩张, BS 取代了历史上的德雷克海峡成为了主要的磷虾渔场, 并指出海冰覆盖率的影响很大。另外, 智利的磷虾渔业也表现出了同样的现象^[20]。高纬度地区是地球上变暖最快的生态系统之一, 也是受气候变暖影响最为剧烈的地区之一。据推测, 全球变暖、海冰覆盖率的进一步减少可能是南极半岛北部水域磷虾捕捞热点区域以及渔场迁移的主要原因。

总体上, 南极半岛北部水域磷虾渔场的变动特点主要表现出由分散演变为集中, 并逐渐向南极大陆收缩, 主要集中在 BS 海域, 作业时间也进一步延长^[10]。而人类的捕捞活动是否已经对该海域以磷虾为中心的生态系统产生了不利的影响

还有待深入研究, 另外, 现有的磷虾资源评估技术可能已经不适用于磷虾渔场的精准评估, 有待于进一步发展。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Atkinson A, Nicol S, Kawaguchi S, *et al.* Fitting *Euphausia superba* into Southern Ocean food-web models: a review of data sources and their limitations[J]. *CCAMLR Science*, 2012, 19: 219-245.
- [2] Stowasser G, Atkinson A, McGill R A R, *et al.* Food web dynamics in the Scotia Sea in summer: a stable isotope study[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 59-60: 208-221.
- [3] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E A, *et al.* A re-appraisal of the total biomass and annual production of Antarctic krill[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(5): 727-740.
- [4] Ericson J A, Hellesey N, Nichols P D, *et al.* Seasonal and interannual variations in the fatty acid composition of adult *Euphausia superba* Dana, 1850 (Euphausiacea) samples derived from the Scotia Sea krill fishery[J]. *Journal of Crustacean Biology*, 2018, 38(6): 662-672.
- [5] Wang L Z, Xue C H, Wang Y M, *et al.* Extraction of proteins with low fluoride level from Antarctic krill (*Euphausia superba*) and their composition analysis[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(11): 6108-6112.
- [6] Agnew D J. *Fishing South: the history and management of South Georgia fisheries*[M]. St Albans: The Penna Press, 2004.
- [7] 陈雪忠, 徐兆礼, 黄洪亮. 南极磷虾资源利用现状与中国的开发策略分析[J]. *中国水产科学*, 2009, 16(3): 451-458.
Chen X Z, Xu Z L, Huang H L. Development strategy on Antarctic krill resource utilization in China[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2009, 16(3): 451-458 (in Chinese).
- [8] Kawaguchi S, Nicol S. Learning about Antarctic krill from the fishery[J]. *Antarctic Science*, 2007, 19(2): 219-230.
- [9] Nicol S, Foster J, Kawaguchi S. The fishery for Antarctic krill-recent developments[J]. *Fish and Fisheries*,

- 2012, 13(1): 30-40.
- [10] CCAMLR Secretariat. Fishery report 2020: *Euphausia superba* in area 48[R]. Tasmania, Australia: Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, 2020.
- [11] 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.
- [12] Stammerjohn S E, Martinson D G, Smith R C, *et al.* Sea ice in the Western Antarctic Peninsula region: spatio-temporal variability from ecological and climate change perspectives[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2008, 55(18-19): 2041-2058.
- [13] Kawaguchi S, Nicol S, Press A J. Direct effects of climate change on the Antarctic krill fishery[J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2009, 16(5): 424-427.
- [14] Constable A J. Lessons from CCAMLR on the implementation of the ecosystem approach to managing fisheries[J]. *Fish & Fisheries*, 2011, 12(2): 138-151.
- [15] Watters G M, Hill S L, Hinke J T, *et al.* Decision-making for ecosystem-based management: evaluating options for a krill fishery with an ecosystem dynamics model[J]. *Ecological Applications*, 2013, 23(4): 710-725.
- [16] Hewitt R, Watkins J, Naganobu M, *et al.* Biomass of Antarctic krill in the Scotia Sea in January/February 2000 and its use in revising an estimate of precautionary yield[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, 51(12-13): 1215-1236.
- [17] Watters G M, Hinke J T, Reiss C S. Long-term observations from Antarctica demonstrate that mismatched scales of fisheries management and predator-prey interaction lead to erroneous conclusions about precaution[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 2314.
- [18] 赵国庆, 罗俊荣, 唐峰华, 等. 基于渔业数据的南极磷虾48渔区渔场时空分布[J/OL]. *渔业科学进展*, 2021: 1-14 [2022-02-16]. <https://doi.org/10.19663/j.issn2095-9869.20210407004>.
- Zhao G Q, Luo J R, Tang F H, *et al.* Temporal and spatial distribution of Antarctic krill in 48 fishing areas based on fishery data[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2021: 1-14 [2022-02-16]. <https://doi.org/10.19663/j.issn2095-9869.20210407004> (in Chinese).
- [19] 张瑛瑛, 徐博, 张衡, 等. 南极磷虾渔场(48渔区)CPUE <https://www.china-fishery.cn>
- 的年、月变化及其与海表温度、叶绿素浓度的关系[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(5): 1685-1694.
- Zhang Y Y, Xu B, Zhang H, *et al.* Interannual and monthly variations of catch per unit effort and the relation with sea surface temperature and chlorophyll concentration in fishing grounds (fishing area 48) of Antarctic krill[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(5): 1685-1694 (in Chinese).
- [20] Arana P M, Roller R, De Caso Á. Chilean Antarctic krill fishery (2011-2016)[J]. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 2020, 48(2): 179-196.
- [21] 赵国庆, 吴祖立, 崔雪森, 等. 基于空间自相关模型的西北太平洋日本鲭渔场时空变动研究[J]. *海洋学报*, 2022, 44(1): 22-35.
- Zhao G Q, Wu Z L, Cui X S, *et al.* Spatial temporal patterns of chub mackerel fishing ground in the Northwest Pacific based on spatial autocorrelation model[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(1): 22-35 (in Chinese).
- [22] 原作辉, 杨东海, 樊伟, 等. 基于卫星AIS的中西太平洋金枪鱼延绳钓渔场分布研究[J]. *海洋渔业*, 2018, 40(6): 649-659.
- Yuan Z H, Yang D H, Fan W, *et al.* On fishing grounds distribution of tuna longline based on satellite automatic identification system in the Western and Central Pacific[J]. *Marine Fisheries*, 2018, 40(6): 649-659 (in Chinese).
- [23] 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).
- [24] 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).
- [25] 刘慧, 朱国平. 南极半岛海域南极磷虾资源时空分布格局及尺度研究[J/OL]. *水产学报*, 2021: 1-9 [2022-02-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.s.20210419.1743.010.html>.
- Liu H, Zhu G P. Spatial and temporal distribution pattern and scale of density distribution for Antarctic krill

- (*Euphausia superba*) in the Antarctic Peninsula[J/OL]. Journal of Fisheries of China, 2021: 1-9[2022-02-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.s.20210419.1743.010.html> (in Chinese).
- [26] 朱国平, 王芮. 南极磷虾渔业CPUE及其丰度估算适用性[J]. 水产学报, 2016, 40(7): 1072-1079.
Zhu G P, Wang R. Catch per unit effort of Antarctic krill (*Euphausia superba*) fishery and its suitability to abundance estimation[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(7): 1072-1079 (in Chinese).
- [27] Fedoulov P P, Murphy E, Shulgovsky K E. Environment-krill relations in the South Georgia marine ecosystem[J]. CCAMLR Science, 1996, 3: 13-30.
- [28] Zhang H, Zhang S M, Cui X S, *et al.* Spatio-temporal dynamics in the location of the fishing grounds and catch per unit effort (CPUE) for Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi* Nichols, 1920) from Chinese trawl fleets on the high seas of the Southeast Pacific Ocean, 2001-2010[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2015, 31(4): 646-656.
- [29] 任平, 吴涛, 周介铭. 基于GIS和空间自相关模型的耕地空间分布格局及变化特征分析——以成都市龙泉驿区为例[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(3): 325-334.
Ren P, Wu T, Zhou J M. Analysis of spatial distribution pattern and evolutionary characteristics of cultivated lands based on spatial autocorrelation model and GIS platform—a case study of Longquanyi District, Chengdu, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(3): 325-334 (in Chinese).
- [30] Ping J L, Green C J, Zartman R E, *et al.* Exploring spatial dependence of cotton yield using global and local autocorrelation statistics[J]. Field Crops Research, 2004, 89(2-3): 219-236.
- [31] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. Geographical Analysis, 1992, 24(3): 189-206.
- [32] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.
- [33] Mackintosh N A. Distribution of post-larval krill in the Antarctic[J]. Discovery Report, 1973, 36: 95-156.
- [34] Reiss C S, Cossio A M, Walsh J, *et al.* Glider-based estimates of meso-zooplankton biomass density: a fisheries case study on Antarctic krill (*Euphausia superba*) around the Northern Antarctic Peninsula[J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 604043.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Santora J A, Veit R R. Spatio-temporal persistence of top predator hotspots near the Antarctic Peninsula[J]. Marine Ecology Progress Series, 2013, 487: 287-304.
- [38] Seyboth E, Félix F, Lea M A, *et al.* Influence of krill (*Euphausia superba*) availability on humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) reproductive rate[J]. Marine Mammal Science, 2021, 37(4): 1498-1506.
- [39] 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).
- [40] Michael K, Suberg L A, Wessels W, *et al.* Facing Southern Ocean warming: temperature effects on whole animal performance of Antarctic krill (*Euphausia superba*)[J]. Zoology, 2021, 146: 125910.

Spatio-temporal evolution characteristics of Antarctic krill (*Euphausia superba*) fishing ground in the northern waters of Antarctic Peninsula based on spatial autocorrelation model

ZHAO Guoqing^{1,2}, SONG Xuefeng², XU Bo³, YANG Jialiang², LI Shuai²,
RAO Xin², HUANG Hongliang², ZHANG Heng^{2*}

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

2. Key Laboratory of Oceanic and Polar Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,
East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;

3. Antarctic Great Wall Ecology National Observation and Research Station,
Polar Research Institute of China, Shanghai 201209, China)

Abstract: Antarctic krill (*Euphausia superba*) is a key species of Antarctic marine ecosystem and the main fishing object of Antarctic fishery, whose fishing ground has significant temporal and spatial distribution characteristics. In order to clarify the changes of krill fisheries in the northern waters of the Antarctic Peninsula, based on the statistical data of *E. superba* fisheries in China from 2010 to 2020, this study analyzed the temporal and spatial distribution characteristics of krill fisheries in this water area by using the global Moran's *I* index and hot spot analysis. The results showed that the spatial distribution of krill catches in the northern waters of the Antarctic Peninsula evolved from dispersion to concentration, and with gradual transition from the north of the South Shetland Islands (SSI) to the Bransfield Strait (BS), with high values distributed along the land. The high value of catch per unit effort (CPUE) mainly occurred in the north of SSI and the side near the Antarctic Peninsula in BS, which was distributed along the land. The krill fisheries in the northern waters of the Antarctic Peninsula showed significant spatial aggregation from 2010 to 2020, and the spatial autocorrelation in 2014, 2015, 2016, 2018 and 2020 was relatively weak. The temporal and spatial evolution characteristics of hot spots and cold spots in the distribution of krill fishing grounds were obvious. The hot spots gradually migrated from the north of SSI to BS, the north of SSI gradually changed from hot spots to cold spots, and the BS gradually changed from cold spots to hot spots. This study discussed the temporal and spatial distribution characteristics of krill fishery, which could not only provide a scientific basis for further research on krill population distribution and fishery formation mechanism, but also provided basic data for improving the production efficiency of krill fishery.

Key words: *Euphausia superba*; spatial autocorrelation; Global Moran's *I*; hot spot analysis; Antarctic Peninsula

Corresponding author: ZHANG Heng. E-mail: zhangziqian0601@163.com

Funding project: National Key Research and Development Program(2018YFC1406802)