

文章编号: 1000-0615(2018)03-0356-10

DOI: 10.11964/jfc.20161110607

## 基于点模式模型的南极半岛北部南极磷虾渔场的时空变动

杨晓明<sup>1,2,3</sup>, 朱国平<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海海洋大学, 上海 201306;

3. 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,  
上海海洋大学, 上海 201306)

**摘要:** 南极磷虾作为南极生态系统中的关键物种, 磷虾渔场时空演变规律对于磷虾海洋生态功能影响及其资源管理十分重要。本研究利用我国磷虾渔业生产数据, 按照月份组合, 针对南极半岛北部磷虾渔业, 采用点模式方法, 利用3个空间因子: 经度、纬度和离岸距离, 获得各月磷虾资源分布最佳点模式模型和模型的方差分析结果, 并以最佳点模式模型推知可能潜在的渔场分布。结果显示, (1)12月磷虾渔场离岸距离最大(为45 km), 随后, 渔场逐渐向南设得兰群岛岸线逼近, 至3月时渔场离岸最近, 3月之后, 磷虾渔场逐渐远离海岸线, 4月和5月渔场离岸距离大约在13 km左右。(2)点模式模型的方差分析结果发现, 12月, 1月, 3月和4月最优点模式模型对模型的方差解释率分别为59%、60%、57%和68%, 空间因子能够较好拟合磷虾渔场分布, 而2月和5月, 空间点模型对总体方差的解释率分别为38%和32%。(3)夏季12—1月, 磷虾渔场分布在乔治王岛北部; 2月, 在利文斯顿岛周围形成第2个渔场, 以及布兰斯菲尔德海峡中部形成第3个渔场; 3—5月渔场基本分布在布兰斯菲尔德海峡沿南极半岛岸线平行方向分布。研究表明, 南极半岛北部磷虾渔场的离岸距离远近与该海域海冰边界消融和生长的规律相吻合; 基于空间因子点模式模型在大部分月份均能较好地拟合磷虾渔场的时空演变规律, 再配合单位捕捞努力量渔获量(CPUE)数据, 可以作为探测磷虾群热区的潜在手段。

**关键词:** 南极磷虾; 空间要素; 点模式模型; 模拟; 南极半岛北部

**中图分类号:** S 934

**文献标志码:** A

南极磷虾[(以下简称磷虾, 通常指南极大磷虾(*Euphausia superba*)]因其巨大的生物量和潜在的渔业价值以及在南极生态系统中的特殊生态地位而日益受到关注<sup>[1-3]</sup>。磷虾资源丰度和分布存在着极为明显的空间、季节性及年际变化<sup>[4-7]</sup>, 而驱动这些变化的动力学关键性因素包括海冰面积、叶绿素浓度及南极绕极流等<sup>[1, 8-13]</sup>。一些学者从生物学和物理学过程解释了产生这些因素和磷虾资源变动的联系机制<sup>[1, 8-13]</sup>。但这些因素和空间因子的关系非常密切, 如海冰会沿岸

线伸展或消融, 海流受到地形和陆地分布影响等, 且存在着强弱变化以及显著的季节和年际差异。相关研究表明, 磷虾资源的变动与离岸距离有着较为密切的关系<sup>[14-15]</sup>, 但迄今为止, 鲜有研究通过点模式方法, 从离岸距离角度探究磷虾渔场的时空变动。而通过点模式方法研究磷虾渔场, 采用的是直接的渔业生产数据资料, 具有直接且简单易行的效应。本研究以月份为分组单元, 利用中国南极磷虾渔业数据, 通过空间因子分析了磷虾渔场的影响效应, 分

收稿日期: 2016-11-08 修回日期: 2017-03-16

资助项目: 国家自然科学基金(41776185); 国家科技支撑计划(2013BAD13B03); 公益性行业(农业)科研专项(201203018); 教育部留学回国人员科研启动基金

通信作者: 朱国平, E-mail: gpzhu@shou.edu.cn

别构建基于空间因子的分布点模式函数, 并在此基础上回归模拟各月的渔场分布情形, 从而了解磷虾渔场随时间的变化规律, 并为预判磷虾潜在渔场提供技术手段。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验数据

磷虾数据来源于磷虾渔业科学观察员数据库, 选取了2009–2013年南极半岛北部磷虾渔业数据。数据字段包括作业日期、产量、作业经纬度和作业时间等信息。

按照月份将数据分组(忽略年份差异), 经、纬度为下网位置和起网位置的中心值, 若出现位置相同点, 则将后一个点位置在经纬度方向上做0.01 km乘以0~1之间随机值偏移处理, 保证位置不重复。收集了该海域夏季(12—2月)和秋季(3—5月)的作业位置信息。同时, 在建模分析之前, 对少数离散点(尤其在空间上)进行了剔除处理。

### 1.2 岸线数据

岛屿及陆地岸线数据来自美国国家海洋大气局(NOAA)环境信息中心(<https://www.ngdc.noaa.gov/>)。通过计算磷虾作业生产点离岛屿岸线的最近欧式距离, 从而获得各点离岸距离千米值。

### 1.3 点过程密度与离岸距离相关性分析

根据地理实体或事件的空间位置, 研究其空间分布模式的方法称为空间点模式。点模式分析通常采用空间条件密度描述空间点的空间分布<sup>[16]</sup>, 该方法在自然灾害<sup>[17]</sup>、城市空间结构<sup>[18]</sup>, 乃至月球撞击坑的空间分布<sup>[19]</sup>等方面均有所应用。通过计算空间变量点过程密度与泊松模型(即CSR)的相对强度计算, 以发现空间变量对点过程的影响, 假定点过程的密度存在一个相关变量 $Z$ , 在任意空间位置 $u$ ,

$$\lambda(u) = \rho(Z(u)) \lambda_0(u) \quad (1)$$

式中,  $\lambda(u)$ 为点过程的密度,  $Z(u)$ 为对应的相关变量的值,  $\rho(Z(u))$ 是相关变量相对于 $\lambda_0(u)$ 模型的比值, 本研究中 $\lambda_0(u)$ 为随机分布模型——泊松模型<sup>[20-21]</sup>。

根据点模式相关分析理论, 泊松模型对应的水平线1.0及区间[0.95, 1.05]之间表示随机分布

区域。因此, 本研究认为水平线1.05之上对应的离岸距离范围, 表示磷虾渔场在离岸距离项上的聚集区间, 并以水平线2.00之上对应的离岸距离范围, 为显著聚集区域。

### 1.4 空间因子的点模式最优模型构建

根据空间因子和点过程密度的关系, 获取基于空间因子的点模式模型函数。该方法为基于最大似然估计的对数线性泊松回归(loglinear-Poisson regression)算法, 采用GLM方法拟合空间点过程密度和各环境因子关系的函数<sup>[22-23]</sup>。

$$\begin{aligned} \log(\lambda(u)) = & \beta_0 + \beta_1 \text{polynom}(x, 2) \\ & + \beta_2 \text{polynom}(y, 2) \\ & + \beta_3 \text{polynom}(dis, 2) + interaction \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 为需要确定的参数,  $x$ 和 $y$ 为经度和纬度变量,  $dis$ 为离岸距离变量 $interaction$ 变量的交互效应。

所有环境因子变量及其交互关系作为变量加入模型拟合, 并通过赤池信息准则(AIC)确定最优模型, 并对模型做方差分析(ANOVA), 获取各因子对总体方差的解释情况, 以此可以确定模型的相对精度。

### 1.5 点模式下的渔场空间模拟

根据获得的最优模型, 使用Metropolis-Hastings算法<sup>[24-25]</sup>, 对各月点过程进行计算, 产生一个新的渔场分布情况。

本研究中的点密度相关分析、点模式拟合和点模式模拟均在R软件中的spatstat模块下实现, 具体请参考文献[24-25]的方法。

## 2 结果

### 2.1 离岸距离对点密度影响

根据点模式密度与离岸距离的相关性计算, 获得各月离岸距离和点密度关系, 12月, 磷虾以聚集形态出现在45~95 km, 显著聚集的范围为50~90 km, 相对密度的极大值超过4, 为各月中相对强度最大值出现的月份(图1)。1月, 磷虾聚集范围为22~58 km, 显著聚集的范围为28~54 km, 相对密度的极大值约为3.5。2月份, 磷虾聚集范围为13~54 km, 显著聚集的范围为18~30 km, 相对密度的极大值约为2.5。3月, 磷虾聚集范围为5~28 km, 显著聚集的范围为11~22 km,

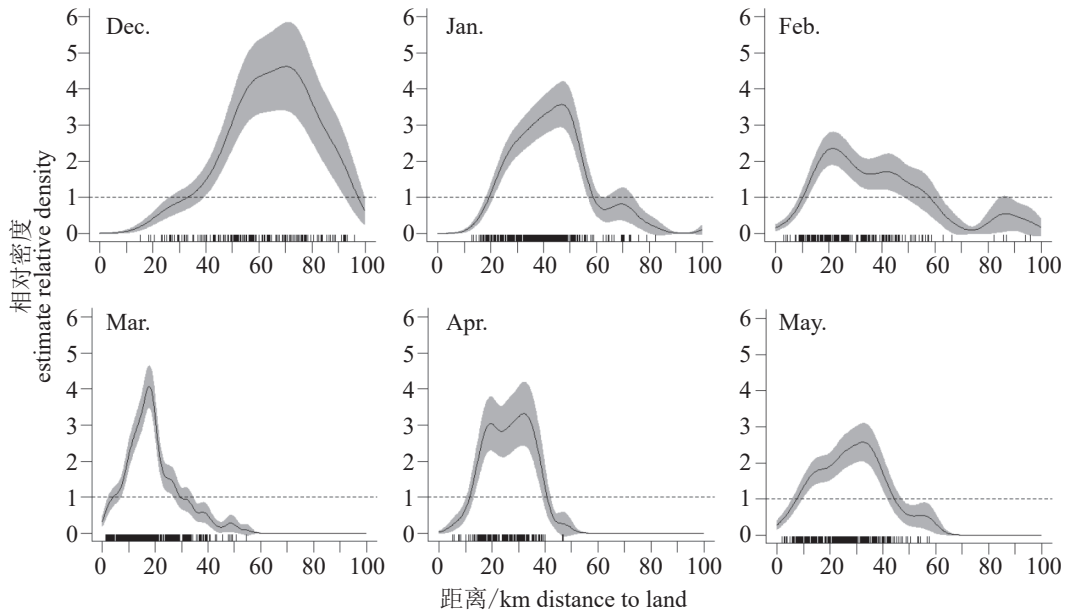


图1 各月的离岸距离点过程与泊松过程的相对密度估计

图中虚线相对强度 $\rho=1.0$ 对应为泊松过程模型，阴影区为95%的置信区间

Fig. 1 Estimated relative density against spatial factors, relative to the poisson model

Dashed line at  $\rho=1.0$  corresponds to the Poisson model function, grey shading is pointwise 95% confidence band

相对密度的极大值约为4.0。4月，磷虾聚集范围为12~40 km，显著聚集的范围为15~38 km，相对密度的极大值约为3.2。5月，磷虾聚集范围为12~42 km，显著聚集的范围为22~38 km，相对密度的极大值为约2.5。

可以看出，12月磷虾渔场离岸距离最大(为45 km)，随着时间推移，逐渐向岸线逼近，至3月时渔场离岸最近，3月之后，磷虾渔场逐渐远离海岸线，渔场离岸距离约为13 km左右，其中4月和5月相差较小。综合显著聚集范围值和极大值可知，12月时，离岸距离对磷虾渔场的影响最大，其次为1月、4月、3月及5月，最后为2月。

## 2.2 最优点模式模型的方差分析

通过拟合经度、纬度及离岸距离和各月点过程密度的点模型，获得各月最优模型变量和各因子的模型方差分析结果(表1，表2)。

通过表1可以发现，12月、1月、3月和4月最优点模式模型对总体方差的解释率均超过50%，分别为59%、60%、57%和68%，说明这4个月点模型的拟合效果较好，3个空间变量基本能够较好地反映渔场的空间分布情况；但2月和5月，空间点模型对总体方差的解释率均低于40%，分别为38%和32%。

## 2.3 渔场的空间分布预测

根据获得的各月点模式模型，模拟获得新的作业点分布，从而对模型进行验证，并预测磷虾渔场的潜在分布。结果显示，12月，磷虾聚集在乔治王岛以北海域，无论实际作业点还是模拟点均出现在近圆形海域内，距离岸线有明显距离。从图2中可知，1月，磷虾渔场向南和向东移动，靠近乔治王岛，并少量进入布兰斯菲尔德海峡东部的中间海域。2月，磷虾渔场分布最为分散，沿着南设得兰群岛北岸近海海域和布兰斯菲尔德海峡整个海域广泛分布。3月和4月基本相似，在布兰斯菲尔德海峡和南极半岛之间，磷虾渔场呈现一个平行于南极半岛岸线整齐的带状分布。5月，和前面两个月分布相似，但在西南位置上，磷虾渔场进入近岸海域，分布带增宽。

从图2中，可以大致绘制出一幅该海域磷虾渔场的演化路径图。12月，磷虾渔场分布在乔治王岛北部，1月向南偏东朝近岸方向移动，至2月，渔场分化，一个渔场保持在南设得兰群岛东北部近海海域，而沿南设得兰群岛向西南，在利文斯顿岛周围形成第二个渔场，还有一个渔场分布在利文斯顿岛以南布兰斯菲尔德海峡

表 1 基于空间变量点模式最优模型偏差分析和显著性检验(夏季)

Tab. 1 The Point Pattern Model significance test and deviance analysis based on spatial variables (austral summer)

		变量 variables	偏差 deviance	Pr值 Pr (>Chi)	解释偏差率/% explanation rate of deviation
12月	Dec.	无效 NULL	417.03		
		经度 $x$	70.825	<0.001***	6.94
		经度平方 $x^2$	288.36	<0.001***	28.26
		纬度平方 $y^2$	227.74	<0.001***	22.32
		离岸距离纬度交互 $dis \times y$	9.92	0.04355 *	0.97
		离岸距离 $dis$	6.63	0.06456'	0.65
		合计 total	1020.50		59%
1月	Jan.	无效 NULL	1145.63		
		经度 $x$	144.17	<0.001***	5.04
		纬度 $y$	284.06	<0.001***	9.94
		经度平方 $x^2$	528.99	<0.001***	18.51
		纬度平方 $y^2$	234.71	<0.001***	8.21
		离岸距离纬度交互 $dis \times y$	12.12	<0.001***	0.42
		离岸距离 $dis$	476.95	<0.001***	16.69
		离岸距离平方 $dis^2$	31.37	<0.001***	1.10
合计 total	28581		60		
2月	Feb.	无效 NULL	838.51		
		经度 $x$	29.174	<0.001***	2.16
		纬度 $y$	83.499	<0.001***	6.18
		经度纬度交互 $x \times y$	22.187	<0.001***	1.64
		离岸距离纬度交互 $dis \times y$	8.396	0.00376**	0.62
		离岸距离 $dis$	168.171	<0.001***	12.45
		离岸距离经度交互 $dis \times x$	190.715	<0.001***	14.1
		离岸距离平方 $dis^2$	10.062	0.00151**	0.74
合计 total			38		

注: 不同显著性检验水平, '\*\*\*'<0.001, '\*\*'<0.01, '\*'<0.05, '.'<0.1。下同

Notes: At different significant codes: '\*\*\*'<0.001, '\*\*'<0.01, '\*'<0.05, '.'<0.1. The same below

中部。3—5月渔场基本分布在布兰斯菲尔德海峡沿南极半岛岸线平行方向分布。由于6月初冬时期, 仍有部分中国磷虾船队在此海域作业, 但数据较少未做分析, 之后完全退出该海域。

从图2中, 对比实际作业点和模拟的分布异同。在12月和1月, 模拟分布基本与实际作业点分布形式基本一致; 2月, 由于渔场分化, 空间因子对模型的解释率也较低(表1, 为38%), 模拟点和实际点之间有较大差异, 需要进一步研

究。3—5月, 模拟点和实际点形态基本一致, 但渔场边界更平滑, 并对渔场中间海域做出补充。

### 3 讨论

#### 3.1 离岸距离对磷虾资源密度的指示及影响因素

Klevjer等<sup>[15]</sup>表示, 近岸与外海磷虾种群在集群行为及分布上的差异很可能是磷虾对本地状况短期反馈的一种反映。磷虾生活在冰缘区的

表 2 基于空间变量点模式模型偏差分析和显著性检验(秋季)

Tab. 2 The Point Pattern Model significance test and deviance analysis based on spatial variables (austral autumn)

		变量 variables	偏差 deviance	Pr值 Pr (>Chi)	解释偏差率/% explanation rate of deviation
3月	Mar.	无效 NULL	915.425		
		经度纬度交互 $x \times y$	115.10	<0.001***	5.35
		纬度 $y$	56.31	<0.001***	2.62
		经度平方 $x^2$	11.08	<0.001***	0.51
		纬度平方 $y^2$	844.27	<0.001***	39.22
		离岸距离纬度交互 $dis \times y$	4.07	0.043711*	0.19
		离岸距离 $dis$	99.28	<0.001***	4.61
		离岸距离经度交互 $dis \times x$	55.64	<0.001***	2.58
		离岸距离平方 $dis^2$	51.66	<0.001***	2.40
	合计 total			57	
4月	Apr.	无效 NULL	417.21		
		纬度 $y$	143.88	<0.001***	10.87
		经度平方 $x^2$	227.20	<0.001***	17.16
		经度纬度交互 $x \times y$	117.73	<0.001***	8.89
		纬度平方 $y^2$	312.27	<0.001***	23.58
		离岸距离纬度交互 $dis \times y$	5.27	0.02166*	0.40
		离岸距离 $dis$	4.73	0.02964*	0.36
		离岸距离平方 $dis^2$	94.83	<0.001***	7.16
			合计 total	1324.16	
5月	May	无效 NULL	1144.619		
		经度 $x$	21.039	<0.001***	1.25
		纬度 $y$	10.383	0.00158**	0.62
		经度平方 $x^2$	30.118	<0.001***	1.79
		经度纬度交互 $x \times y$	181.819	<0.001***	10.80
		纬度平方 $y^2$	150.816	<0.001***	8.96
		离岸距离 $dis$	92.568	<0.001***	5.50
		离岸距离经度交互 $x \times dis$	24.716	<0.001***	1.47
		离岸距离平方 $dis^2$	26.679	<0.001***	1.59
	合计 total	1682.76		32	

一个狭窄分布带上<sup>[26]</sup>, 磷虾船队作业随着海冰融解南退的边界线, 不断朝南推进。同时, 这些海冰消解过程中, 会出现海藻的暴发, 提供给磷虾所需食物<sup>[27]</sup>, 磷虾资源各月离岸距离限制线能够较好地和海冰边界线相关联。海冰的增长和消融受大气和海洋环境影响, 包括气温,

风、海流和海表温度等。最小和最大海冰覆盖分别发生在2—3月和8—10月, 涉及到约75%~80%海冰<sup>[28-29]</sup>。南大洋强烈的平流胁迫与磷虾生命史过程之间存在着大量的相互影响<sup>[30]</sup>, 而可能会导致磷虾一生中近岸和外海环境, 并受到海冰季节性变化的影响<sup>[12]</sup>。本研究中, 磷虾中

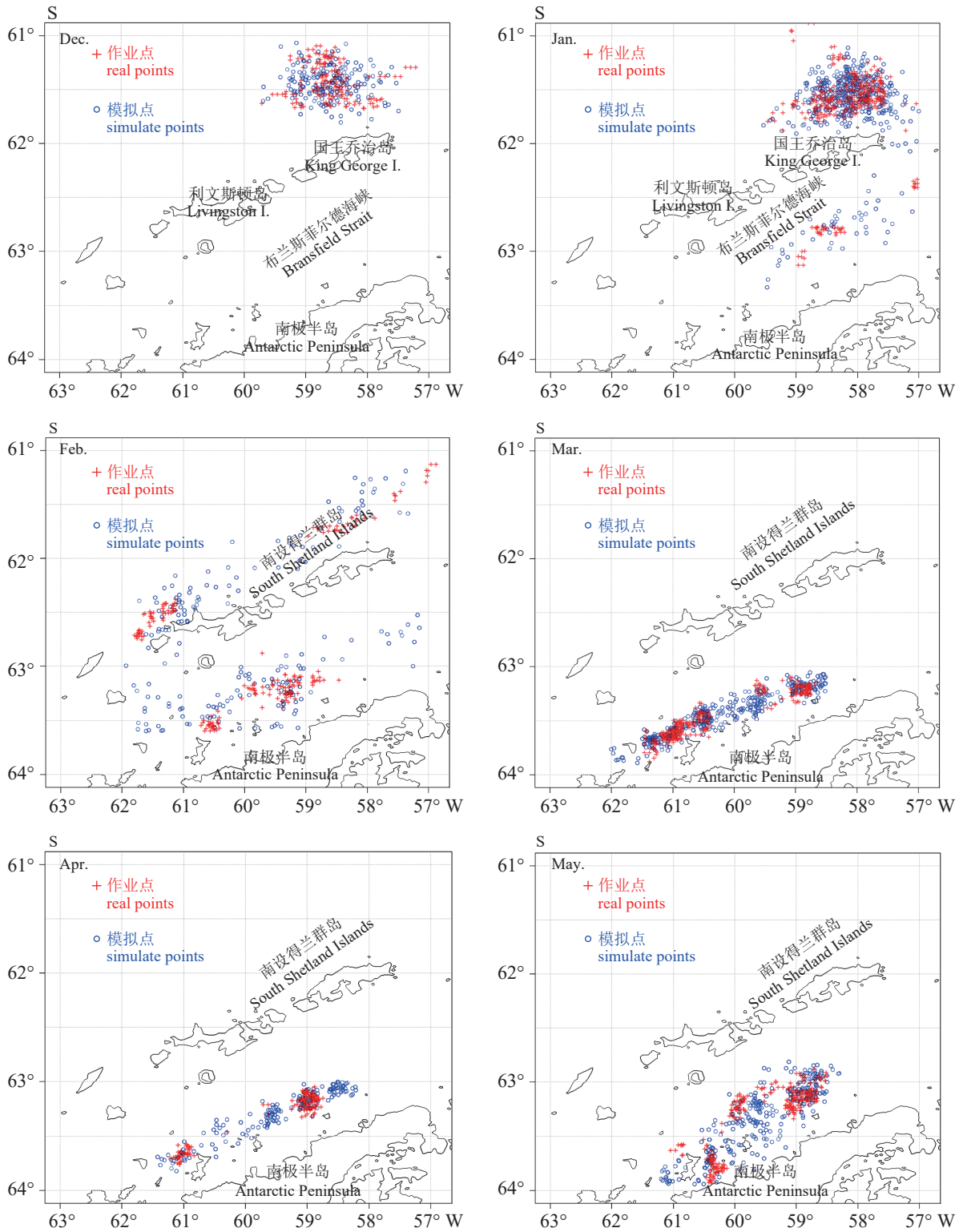


图 2 各月磷虾渔场预测分布示意图

Fig. 2 Predicted monthly distribution map of krill fishing ground from December to May, respectively

心渔场的离岸距离随时间逐渐向岸靠近, 并存在季节性差异, 夏初(12月)最远(45 km), 夏末秋初(3月)最近, 秋季(4、5月)离岸距离开始增加,

这与海冰的移动有着明显的一致性。日本20世纪90年代的调查也发现了磷虾资源密度沿岸线分布的规律, Ichii等<sup>[31]</sup>认为, 由夏初至中期, 磷虾密

度增加并表现出明显的离岸-近岸丰度和成熟阶段差异；夏季中期，磷虾密度呈大洋区域、大陆坡锋面区域及近岸区域逐渐增高的趋势。Klevjer等<sup>[15]</sup>表示，夏季(1—2月)，斯科舍海磷虾群由近岸向外海呈显著减少趋势，0~50 km内的磷虾群生物量为200 km以外水域磷虾群的2倍以上。从这点上来讲，如配合单位捕捞努力量渔获量(CPUE)数据，可以将磷虾渔船的作业位置作为磷虾群热区的潜在指标。

### 3.2 南极半岛北部渔场空间演变及其原因

20世纪90年代及之前，斯科舍海曾开展了多次磷虾资源的大规模调查，结果显示南极海洋生物资源养护委员会(CCAMLR)48.1亚区的磷虾资源主要分布于南设得兰群岛以北沿海，传统上的磷虾渔业夏季于无冰区作业，冬季则围绕在乔治王岛周围，春、夏季和秋季向南推进<sup>[31-32]</sup>。本研究发现，传统的磷虾渔业作业海域逐渐削弱，而如今磷虾渔业主要发生于夏末至秋季。可能的原因是冬季南极半岛周围海冰因气候变化不断减少有关。海冰在南大洋起着重要的生态角色，可能影响到磷虾资源变动，并进而对磷虾渔业有直接的显著意义。南极半岛是地球上最快的变暖区域，海冰在冬季的范围显著下降。南极大西洋扇区冬季海冰的衰减导致的结果就是磷虾渔业的捕捞季节扩展，甚至渔业船队已经能够于冬季在靠南海域作业<sup>[33]</sup>。

相关研究表明，如今磷虾渔业集中于南极大西洋扇区，而该区域也被认为是最大的磷虾资源分布区<sup>[34]</sup>，尽管整个CCAMLR 48区存在许多渔场，但投入在这些位置的捕捞努力量年际差异较大。在一些年份里，磷虾渔业作业位置明显聚集于某些特定的区域，如布兰斯菲尔德海峡。本研究中CCAMLR 48.1亚区磷虾渔场与该情况保持一致。但通常认为，冬季覆冰范围最广，这为磷虾种群提供了良好的庇护场所，以免其被渔业和捕食者影响，但其他季节，尤其是夏季，海冰减少将移除这项保护壁垒，这严重影响着磷虾资源的动态变化<sup>[35-36]</sup>。而如今，越来越多的捕捞努力量出现在秋、冬季节，且集中于南极半岛近岸海域，该情况有悖于之前关于磷虾群季节性分布的推论。考虑到南极磷虾集群的影响因素较多，而其所表现的昼夜垂直移动<sup>[37]</sup>是导致渔获量和磷虾聚集位置变化的主要

因子<sup>[4, 35]</sup>。

### 3.3 模型的误差来源分析

中国南极磷虾渔业渔场选择不仅受到本地磷虾丰度的影响，同时还受到预定的决策、渔船条件及市场因素等的影响<sup>[38]</sup>。同时，由于中国南极磷虾渔队规模较小，对渔场的分布掌握程度也会受到影响。同时，环境年际间的变化会导致磷虾资源存在着极为明显的年际变化<sup>[4-7]</sup>，这些导致本研究中综合多年的点分布数据有较大的误差。

另外，由图2可以发现，相较实际作业密度分布，模拟的作业分布基本可以反映出渔场所在位置，分布也更为均匀。本研究中，获得的点模式拟合方程采用的为二次多项式对经度、纬度和离岸距离作最大似然估计而得。获得的是多个关于空间因子的标准平滑二次多项式方程的组合，因此存在高峰区域和中间低谷区域被平滑，以及边界的扩展。部分拟合中出现的区域，将可能是磷虾资源未来可能作业区域。

但基于空间因子的点模式模型模拟的磷虾渔场，会受到作业区域范围的影响，得出的磷虾作业密度与经度和纬度关系函数只能获得已知的作业空间附近磷虾密度的情况，对于未作业的海域，无法推知资源密度情况。

## 4 结论

基于以上阐述，磷虾渔场的离岸距离远近与海冰的消融和扩散规律相吻合，当海冰消融时，磷虾渔场不断靠近岸线，当海冰扩展时，磷虾渔场逐渐远离岸线。

基于空间因子的点模式模型大部分月份均能较好地拟合磷虾渔场的时空演变规律，如12月、1月、3月和4月。但随着季节转换(如2月和5月)，渔场呈现分化，空间因子对磷虾渔场分布的发现能力有限，因此在此时期，应该更多结合环境条件发现潜在磷虾渔场。基于空间因子的点模式模型，并配合单位捕捞努力量渔获量数据，可以作为探测磷虾群热区的潜在手段。

通过我国磷虾渔业数据发现了南极半岛北部磷虾渔船的分布规律，夏季初期和中期，渔场分布在乔治王岛北部附近；夏季后期，部分进入利文斯顿岛周围，部分进入布兰斯菲尔德海峡；秋季分布于布兰斯菲尔德海峡；至冬季

中期, 退出布兰斯菲尔德海峡。

感谢中国南极磷虾渔业科学观察员的辛勤工作及南极磷虾渔船船长和船员在取样过程中给予的帮助!

#### 参考文献:

- [1] Hofmann E E, Murphy E J. Advection, krill, and Antarctic marine ecosystems[J]. *Antarctic Science*, 2004, 16(4): 487-499.
- [2] 孙松, 刘永芹. 南极磷虾与南大洋生态系统[J]. *自然杂志*, 2009, 31(2): 88-90.  
Sun S, Liu Y Q. Antarctic krill and Southern Ocean ecosystem[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2009, 31(2): 88-90(in Chinese).
- [3] 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).
- [4] Kawaguchi S, Nicol S, Taki K, *et al.* Fishing ground selection in the Antarctic krill fishery: Trends in patterns across years, seasons and nations[J]. *CCAMLR Science*, 2006, 13: 117-141.
- [5] Siegel V, De La Mare W K, Loeb V. Long-term monitoring of krill recruitment and abundance indices in the Elephant Island area (Antarctic Peninsula)[J]. *CCAMLR Science*, 1997, 4(1): 19-35.
- [6] Lascara C M, Hofmann E E, Ross R M, *et al.* Seasonal variability in the distribution of Antarctic krill, *Euphausia superba*, west of the Antarctic Peninsula[J]. *DeepSea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1999, 46(6): 951-984.
- [7] 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).
- [8] 杨晓明, 朱国平. 南极大西洋扇区南极磷虾渔获率序列的振荡模态分析[J]. *中国水产科学*, 2013, 20(6): 1274-1283.  
Yang X M, Zhu G P. Oscillation mode analysis on the time series of Antarctic krill(*Euphausia superba*) catch rate in the Atlantic Sector of Antarctic Ocean[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(6): 1274-1283(in Chinese).
- [9] Fedoulov P P, Murphy E, Shulgovsky K E. Environment-krill relations in the South Georgia marine ecosystem[J]. *CCAMLR Science*, 1996, 3: 13-30.
- [10] Murphy E J, Watkins J L, Reid K, *et al.* Interannual variability of the South Georgia marine ecosystem: Biological and physical sources of variation in the abundance of krill[J]. *Fisheries Oceanography*, 1998, 7(3-4): 381-390.
- [11] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E, *et al.* Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean[J]. *Nature*, 2004, 432(7013): 100-103.
- [12] Murphy E, Watkins J, Trathan P, *et al.* Spatial and temporal operation of the Scotia Sea ecosystem: A review of large-scale links in a krill centred food web[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007, 362(1477): 113-148.
- [13] Nicol S. Krill and currents-physical and biological interactions influencing the distribution of *Euphausia superba*[J]. *Ocean and Polar Research*, 2003, 25(4): 633-644.
- [14] Cresswell K A, Tarling G A, Thorpe S E, *et al.* Diel vertical migration of Antarctic krill (*Euphausia superba*) is flexible during advection across the Scotia Sea[J]. *Journal of Plankton Research*, 2009, 31(10): 1265-1281.
- [15] 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.
- [16] Diggle P J. *Statistical Analysis of Spatial Point Patterns*[M]. 2nd ed. London, UK: Arnold, 2003.
- [17] 李珊珊, 黄翔, 宫辉力, 等. 基于点模式的地震重灾区滑坡空间分布特征研究[J]. *自然灾害学报*, 2015, 24(2): 40-51.  
Li S S, Huang X, Gong H L, *et al.* Research on characteristics of landslide spatial distribution in earthquake heavy disaster area based on point pattern[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(2): 40-51(in Chinese).



- [18] 郭洁, 吕永强, 沈体雁. 基于点模式分析的城市空间结构研究——以北京都市区为例[J]. 经济地理, 2015, 35(8): 68-74, 97.  
Guo J, Lyu Y Q, Shen T Y. Urban spatial structure based on point pattern analysis—taking Beijing metropolitan area as a case[J]. Economic Geography, 2015, 35(8): 68-74, 97(in Chinese).
- [19] 王娇, 周成虎, 程维明. 全月球撞击坑的空间分布模式[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(4): 512-519.  
Wang J, Zhou C H, Cheng W M. The spatial pattern of lunar craters on a global scale[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(4): 512-519(in Chinese).
- [20] Baddeley A, Chang Y M, Song Y, *et al.* Nonparametric estimation of the dependence of a spatial point process on spatial covariates[J]. Statistics and its Interface, 2012, 5(2): 221-236.
- [21] Baddeley A, Turner R. Modelling spatial point patterns in R[M]//Baddeley A, Gregori P, Mateu J, *et al.* Case Studies in Spatial Point Process Modeling. New York: Springer Verlag, 2006: 23-74.
- [22] Baddeley A, Coeurjolly J F, Rubak E, *et al.* Logistic regression for spatial Gibbs point processes[J]. Biometrika, 2014, 101(2): 377-392.
- [23] Berman M, Turner T R. Approximating point process likelihoods with GLIM[J]. Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics), 1992, 41(1): 31-38.
- [24] Baddeley A. Analysing Spatial Point Patterns in R[M]. Australia: CSIRO, 2010.
- [25] Baddeley A, Rubak E, Turner R. Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R[M]. Canada: CRC Press, 2015.
- [26] Brierley A S, Fernandes P G, Brandon M A, *et al.* Antarctic krill under sea ice: Elevated abundance in a narrow band just south of ice edge[J]. Science, 2002, 295(5561): 1890-1892.
- [27] Everson I, Goss C. Krill fishing activity in the southwest Atlantic[J]. Antarctic Science, 1991, 3(4): 351-358.
- [28] Zwally H J, Comiso J C, Parkinson C L, *et al.* Variability of Antarctic sea ice 1979-1998[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(C5): 9-1.
- [29] Comiso J C. Large-scale characteristics and variability of the global sea ice cover[M]//Thomas D N, Dieckmann G S. Sea Ice: An Introduction to Its Physics, Chemistry, Biology and Geology. Oxford: Blackwell Science, 2003: 112-142.
- [30] Krill, currents and sea ice: *Euphausia superba* and its changing environment[J]. Bioscience, 2006, 56(2): 111-120.
- [31] Ichii T, Katayama K, Obitsu N, *et al.* Occurrence of Antarctic krill (*Euphausia superba*) concentrations in the vicinity of the South Shetland Islands: Relationship to environmental parameters[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1998, 45(8): 1235-1262.
- [32] Jones C D, Ramm D C. The commercial harvest of krill in the Southwest Atlantic before and during the CCAMLR 2000 Survey[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2004, 51(12): 1421-1434.
- [33] Kawaguchi S, Candy S G. Quantifying movement behaviour of vessels in the Antarctic krill fishery[J]. CCAMLR Science, 2009, 16: 131-148.
- [34] 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.
- [35] Kawaguchi S, Nicol S. Learning about Antarctic krill from the fishery[J]. Antarctic Science, 2007, 19(2): 219-230.
- [36] Siegel V, Reiss C S, Dietrich K S, *et al.* Distribution and abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*) along the Antarctic Peninsula[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2013, 77: 63-74.
- [37] 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): 1242-1249.  
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): 1242-1249.
- [38] 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).

## Spatial-temporal variation on *Euphausia superba* fishing ground in the northern Antarctic Peninsula based on point pattern model

YANG Xiaoming<sup>1,2,3</sup>, ZHU Guoping<sup>1,2,3\*</sup>

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

2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, 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)

**Abstract:** As a key species in the Antarctic ecosystem, the spatial and temporal dynamics of Antarctic krill's fishing ground is becoming important issues for the role effects of krill's oceanic ecosystem function and resource management. Using multi-year Chinese krill fishery scientific data by month group, combining three spatial factors - longitude, latitude and offshore distance, the optimal point pattern model of monthly krill distribution and the variance analysis results were obtained for the krill fishery in the northern Antarctic Peninsula based on the spatial point pattern method, and the possible potential fishing grounds were predicted based on the proposed optimal point pattern model. The results were: (1) In December, the greatest distance of fishing grounds to shore (45 km) can be found. Subsequently, the fishing grounds were gradually approaching coastline of the South Shetland Islands. By March the fishing grounds were at the least distance to the Antarctic Peninsula shoreline. After March, fishing ground gradually retreated from the coastal area, in April and May distance of fishing grounds to shore maintained about 13 km. (2) The variance analysis of the optimal point pattern model indicated the explained rates of variance to the model in December, January, March and April were 59%, 60%, 57% and 68%, respectively. Spatial factors can fit the distribution of krill fishing ground very well in these months. But in February and May, the explained rate of the variance to spatial point pattern model reduced to 38% and 32%, respectively. (3) Fishing grounds were located in the northern King George Island during austral summer (December to January). In February, a secondary fishing ground was formed around the Livingston Island, and the third fishing ground occurred in the middle of the Bransfield Strait. During March-May fishing ground distributed along in the Bransfield Strait paralleled to the Antarctic Peninsula. In conclusion, the offshore distance of the fishing ground coincided with the extension and retreating of the sea ice boundary in the northern Antarctic Peninsula. The point pattern model of krill fishery based on spatial factors can well fit the temporal and spatial evolution of krill fishing ground in most months. Combined with the catch per fishing unit (CPUE), the point pattern model can be used as a potential technique to explore the hotspot of krill aggregation.

**Key words:** *Euphausia superba*; spatial factors; point pattern model; simulation; the northern Antarctic Peninsula

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

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (41776185); National Key Technology R& D Program the Ministry of Science and Technology of China (2013BAD13B03); Special Fund for Argo-scientific Research in the Public Interest of China (201203018); Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of the Education Ministry