

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16183

基于点格局的中西太平洋金枪鱼围网中鲣的空间格局特征

杨晓明^{1, 2, 3, 4}, 戴小杰^{1, 2, 3, 4}, 王学昉^{1, 2, 3, 4}, 田思泉^{1, 2, 3, 4}

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 201306;
3. 远洋渔业协同创新中心, 上海 201306;
4. 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306

摘要: 中西太平洋海域 10°N~10°S 是我国金枪鱼围网渔业的主要生产海域, 本研究采用点格局分析方法对自由群鲣(*Katsuwonus pelamis*)和随附群鲣的空间格局特征进行分析。根据我国渔业公司 2015 年 23 艘围网渔船的渔捞日志数据, 采用点格局分析方法的单变量函数配对相关函数 $g(r)$ 、交叉相关函数 $J_{12}(r)$ 和标记相关函数 $k_{mm}(r)$ 对不同集群(自由群和随附群)的鲣资源的空间分布格局及竞争关系进行了研究。发现围网自由群和随附群点事件的空间分布上都是非均质的, 表现为聚集性; 自由群在 1.9°~2.3°尺度下表现出随机分布格局。表明热带太平洋鲣在生命史的两个不同阶段, 空间格局为相互吸引的集聚式分布特征, 其原因在于中西太平洋鲣喜好生活于高温低盐的暖池东侧水域, 且有永久收敛的表层水团和盐度锋面能够提供鲣群所需的生物饵料; 出现随机分布的原因为这个海域的饵料生物分布的斑块状和不可持续性, 鲣高度洄游特性能够保证其跟随饵料迁徙。在 0°~0.35°尺度下, 自由群和随附群的关系为竞争关系; 当空间尺度超过 0.35°后, 随着尺度增大, 两者关系为随机性关系。在随附群在空间尺度超过 0.8°后, CPUE 之间表现为正相关, 有相对较弱的聚集热点和冷点区域, 其他各尺度上 CPUE 为随机关系; 自由群的 CPUE 在各尺度上都表现为随机关系。总之, 自由群鲣和随附群鲣的空间格局在小尺度下表现为排斥竞争关系, 在较大尺度下为独立的随机关系, 其竞争关系主要为食物的有限性导致。

关键词: 围网; 鲣; 空间格局; 点格局分析; 标记相关函数; 中西太平洋

中图分类号: S932

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)03-0633-07

中西太平洋海域是我国金枪鱼围网渔业的主要生产海域, 鲣(*Katsuwonus pelamis*)占总产量的70%以上, 是最主要目标鱼种。商业捕捞中鲣资源以点事件形式在空间分布, 其渔场形成是一系列生态过程综合作用的结果, 这种分布格局不仅能反映环境对种群内个体生存和生长的影响, 也是种群的生物特性、生态适应对策及种间关系等多种作用的综合表现^[1-2]。点格局方法能从全局上揭示事件的尺度相关的空间分布特性, 在空间模式上表现为随机、集聚和均匀等特征, 还可描述两类事件空间模式的关系, 体现物种间的吸引、独

立和排斥关系^[3]。点格局方法是一种基于已存数据分析物种间关系的模型手段^[4], 可在较大尺度如全球的某局部区域下^[5]探讨种群空间模式形成^[6]以及与环境之间的关系^[7]。近年来, 该方法开始应用于海洋生态领域, 如海山和金枪鱼渔业分布和热点的关系^[1]、海狮分布的空间模式与环境的关系^[6]、海底地形和捕食动物分布热点的关系^[8]等。

自由鱼群的优势叉长比随附群要长 10 cm 左右^[9]。与自由鱼群相比, 随附鱼群中幼鱼和未达到性成熟的个体占比更大, 因此两种鱼群在一定程度上代表着鲣在不同生命史阶段的集群特点。研

收稿日期: 2016-06-15; 修订日期: 2016-07-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41106118); 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室开放基金项目(A1-0203-16-2007-3).

作者简介: 杨晓明(1972-), 男, 副教授, 研究方向渔业 GIS. E-mail: xmyang@shou.edu.cn

通信作者: 戴小杰, 教授. E-mail: xjdai@shou.edu.cn

究鲣的自由群和随附群两类点事件关系, 首先是希望发现较小个体群体的随附群或较大个体群体的自由群之间在空间上的关系是吸引、独立或是排斥; 其次是两个群体之间的交叉关系是正相关、随机或是负相关, 种间的关系分别为吸引、独立或是排斥; 最后, 用标记相关函数的方法探讨两类群体各自的富集程度, 以单位捕捞努力量渔获量(Catch Per Unit Efforts, CPUE)值大小表示, 探讨在空间分布上是否存在热点和冷点区域。旨在理解该海域鲣围网渔场形成的外在和内在驱动机制, 为将来围网生产渔情预报和作业布局的选择提供支撑。

1 数据与方法

1.1 渔业数据

本研究采用我国渔业公司 2015 年 23 艘围网渔船每日的渔捞日志数据, 内容包括: 作业类型、经纬度、分鱼种产量和鱼群类型等。由于点格局分析方法需要假定空间采样的随机性, 而主要的围网生产区域有小公海, 其内禁止围网作业, 因此, 以此小公海将围网主要渔场分为东、西两个海域(图 1)。本研究采用以瑙鲁和基里巴斯(吉尔伯特群岛)专属经济区海域为分析窗口, 根据鱼群

集群类型划分为自由群和随附群: 自由群为捕捞对象分布在表层的、自由移动的鲣群; 随附群为鱼群聚集在漂浮物体如流木或者人工集鱼装置下的鲣群^[10]。

1.2 g 函数

点格局分析是空间统计学的方法之一, 用于探索某一物种的分布格局的特性是聚集分布、随机分布或是均匀分布, 以及这些特性随着空间尺度变化的关系^[2]。本研究中 $g(r)$ 是一种各种尺度相互独立的分析空间点格局的方法, 它由 Ripley's K 函数演化而来, 是一个能较为准确地反映空间格局类型的函数^[11]。在判定一定尺度上的空间格局类型时比 K 函数更有效^[12]。简单来说, g 函数就是考量研究区内距某点距离为 r 的个体数目的函数。表达式为^[13]:

$$g(r) = \frac{1}{2\pi r} \frac{A^2}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{W_{ij}} k_h(r - u_{ij}) \quad (1)$$

式中, A 为海域面积; n 为某点事件总次数; u_{ij} 为点 i 和点 j 之间的距离; r 为空间尺度; W_{ij} 为以点 i 为圆心, u_{ij} 为半径的圆落在面积 A 中的比例, 用于校正边界效应引起的误差; k_h 为 Kernel 函数, 是误差范围参数, 当两点之间的距离不等于 r 且大

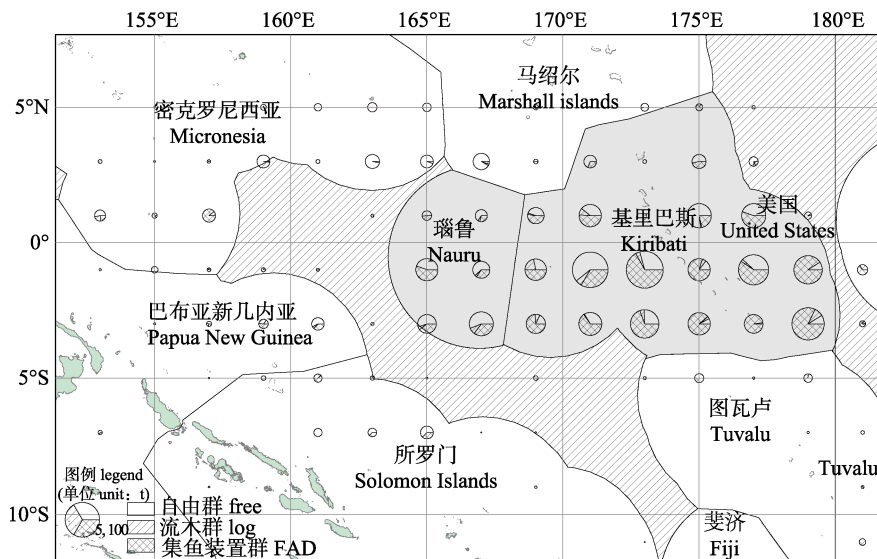


图 1 2015 年我国中西太平洋海域围网鲣产量分布

阴影部分为本研究的区域, 斜线区域为公海。

Fig. 1 The Skipjack's catch of Chinese Vessels distribution in Western and Central Pacific Ocean in 2015
This study window is the grey shading area; oblique line area is high sea.

于 h 时, 该值为 0。

1.3 交叉相关函数

对于两类种群的交叉相关函数, 采用最近相邻距离分析的分布函数 $G^{[2]}$ 和二阶 $K^{[13]}$ 函数是最常用的方法, 而对于多类型的标记, J 函数^[14]比较有效。本研究采用了交叉 J (cross- J) 函数分析方法。

假定多类型点过程 X 是平稳分布, X_j 表示类型 j 的子过程, 其分布强度为 λ_j 。对于两类子过程 i 和 j , F_j 为 X_j 的空白空间函数(empty space function), G_{ij} 表示从类型 i 到类型 j 的最短距离的分布函数^[2, 14-16]。交叉 J 函数计算如下:

$$J_{ij}(r) = \frac{1 - G_{ij}(r)}{1 - F_j(r)} \quad (2)$$

当 $J_{12}(r) = 1$ 表明两个事件在 r 尺度下无关联性, $J_{12}(r) > 1$ 表示两事件是正相关, $J_{12}(r) < 1$ 表示两事件是负相关。

1.4 标记相关函数

标记空间点格局(marked point pattern)是附带属性的空间点结构。点可代表研究对象在空间的位置, 而标记则可以代表一些附加信息, 由于能够提供空间点格局的重要补充信息, 标记点格局分析方法十分必要。标记相关函数可用于检测标记点格局中标记之间相关性, 标记相关函数 $k_{mm}(r)$ 函数的计算方法如下^[15-17]:

$$k_{mm}(r) = \frac{\sum M(o)M(u)}{\sum (M \times M')} \quad (3)$$

式中, o 和 u 代表距离 r 的两类物种个体; $M(o)$ 、 $M(u)$ 分别表示两个点的标记属性; M 是从标记的边际分布中独立抽取的随机标记, 为标记的均值, M' 是其矩阵转置。 $k_{mm}(r)$ 是 $M(o)M(u)$ 的非标准化均值, 当 $k_{mm}(r) = 1$ 时, 标记之间相互独立; 当 $k_{mm}(r) < 1$ 时, 标记之间呈负相关; 当 $k_{mm}(r) > 1$ 时, 标记之间呈正相关。

1.5 数据预处理的说明

本研究中, 零假设就是认为在这个海域内渔船均可能随机出现。该区域也是本研究点格局分析的窗口区域。

渔获率采用 CPUE 计算, 使用单次投网的渔获量(单位: t)除以作业时间(单位: 天)而得。点事

件定义为鳀的 CPUE 大于 10 t/vessel·d, 为一次资源富集点事件。

分析集群个体空间格局时, 配对相关函数(pair correlation function, pcf)采用完全随机模型(complete spatial randomness, CSR), 用 Monte-Carlo 模拟检验 99 次, 计算得到上、下包迹线围成的 99% 的置信区间。

点格局判断时, 当 $g(r)$ 位于上包迹线之上时为聚集分布, 位于上下包迹线之间时为随机分布, 位于下包迹线之下时为均匀分布。

二元相关点格局进行检验时, 当 $J_{12}(r)$ 位于上包迹线之上时为两者正相关, 位于上下包迹线之间时为两者无显著性相关, 位于下包迹线之下时为两者负相关。

标记相关函数进行检验时, 函数值位于上包迹线之上时为正相关, 位于上下包迹线之间时无相关性, 位于下包迹线之下时为负相关。曲线值 k_{mm} 位于阴影区域表示随机关系。

数据计算和分析在 R 3.2.5 及其 spatstat 软件包^[18]中完成。

2 结果与分析

2.1 点格局分析结果

围网渔业点格局在窗口下的空间尺度和空间格局类型的关系以及它们的差异由各自的 $g(r)$ 的值所示(图 2)。通过观察可以发现, 除了自由群在 $1.9^\circ \sim 2.3^\circ$ 的尺度下表现出随机分布格局外; 其他情况, 金枪鱼围网自由群和随附群点事件的空间分布格局都呈现出非均质的特点, 表现为聚集性。

2.2 交叉相关函数分析结果

为获得围网中的鳀鱼不同集群方式下, 在空间分布格局上的相互关系, 采用交叉 J 相关函数计算, 结果见图 3。在 $0^\circ \sim 0.35^\circ$ 尺度下, 自由群和随附群的关系就变为负相关, 即竞争关系。当空间尺度超过 0.35° 的尺度后, 随着尺度增大, 两者的关系竞争关系为随机性关系所替代。

2.3 标记相关函数分析结果

2015 年金枪鱼鳀围网的随附群和自由群的 CPUE 标记相关函数 $k_{mm}(r)$ 分析结果如图 4 所示。随附群 k_{mm} 在各尺度上都在 1 以上, 即 CPUE 之

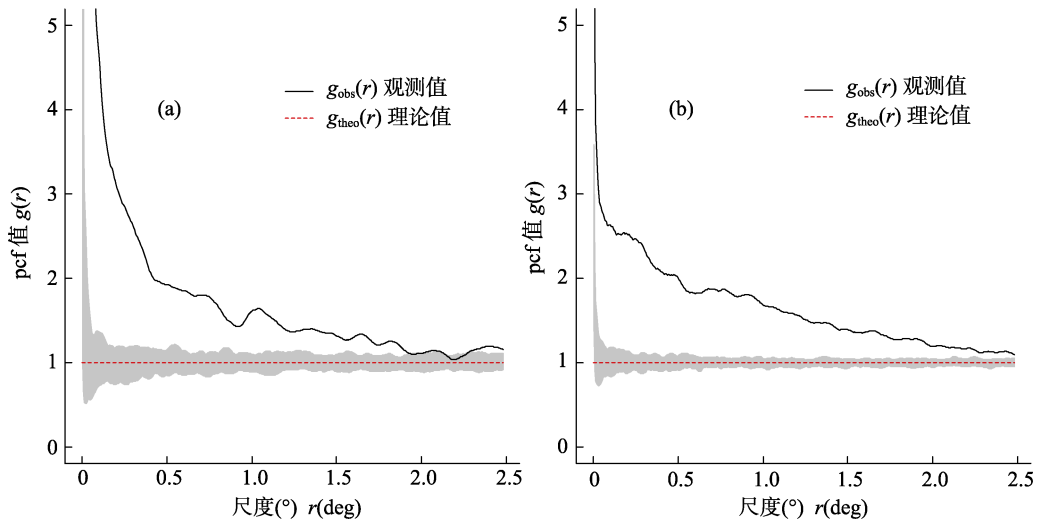


图 2 2015 年金枪鱼围网自由群鲹(a)和随附群鲹(b)围网空间点过程的配对相关函数曲线
黑线表示数据点格局函数值; 阴影为 Monte Carlo 检验的置信区间, 拟合次数为 99, 置信水平为 99%.

Fig. 2 Point pattern of pair correlation function $g(r)$ for spatial point process of unassociated school skipjack (a) and associated school skipjack (b) of 2015 purse seine
Black line indicates value of the function for the data point pattern; the grey shade indicates 99% confidence level via Monte Carlo 99 times simulation.

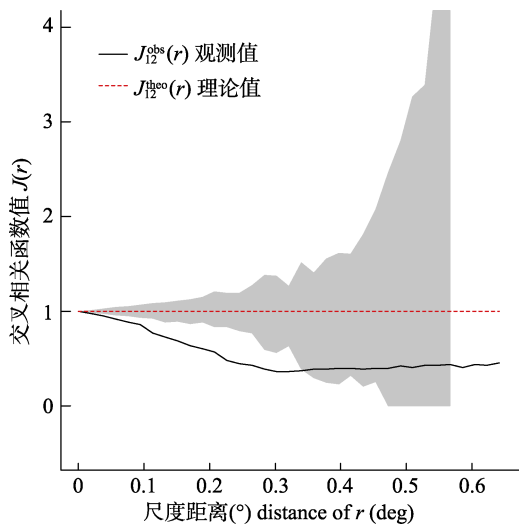


图 3 2015 年金枪鱼围网自由群鲹和随附群鲹点过程的交叉相关分析结果

黑线表示数据点格局相应函数值; 阴影为 Monte Carlo 检验的置信区间, 拟合次数为 99, 置信水平为 99%.

Fig. 3 Point patterns analysis of the cross-J functions between unassociated school and associated school of 2015 purse seine
Black line indicates value of the function for the data point pattern, the grey shade indicates 99% confidence level via Monte Carlo 99 times simulation.

间表现为正相关; 当空间尺度超过 0.8° 后, 这种相关性基本上都通过了显著性检验; 其他各尺度上, CPUE 关系为随机关系。鲹自由群 CPUE 的 k_{mm}

随着尺度变化, 在 $k_{mm}(r)=1$ 上下波动, 在各尺度上都表现为随机关系。

3 讨论与结论

3.1 空间点格局特征的生物和生态学解释

点格局分析能够分析不同尺度下的种群格局和种间关系, 空间格局形成是物种的生物因子和环境因子共同作用的综合表现, 在不同空间尺度表现不一样^[3]。

本研究对象鲹为栖息于热带太平洋水域表层的鱼类, 对温度和初级生产力环境因子高度敏感^[19-20]。鲹资源在各个尺度上表现出聚集特性, 被吸引在特定区域内。首先从渔场机制来看, 在西太平洋暖池东侧有一永久收敛的表层水团, Picaut 等^[21]以潮流、营养盐及漂流瓶模拟来观察, 发现此收敛区为一显著的盐度锋面。此盐度锋面是由于信风东风吹送表层流, 使得中东太平洋低温高盐水与西太平洋低盐暖水交会, 产生水平对流所致。此一收敛区和锋面是聚集浮游生物、微形自泳生物及较大掠食者的重要机制, 而鲹的分布受收敛带位移动影响有相近的反应。其次从鲹行为方式来看, 鲹喜好集群于涌升流及冷暖水团交汇海域, 其日间垂直分布可自表层水域至 260 m 深

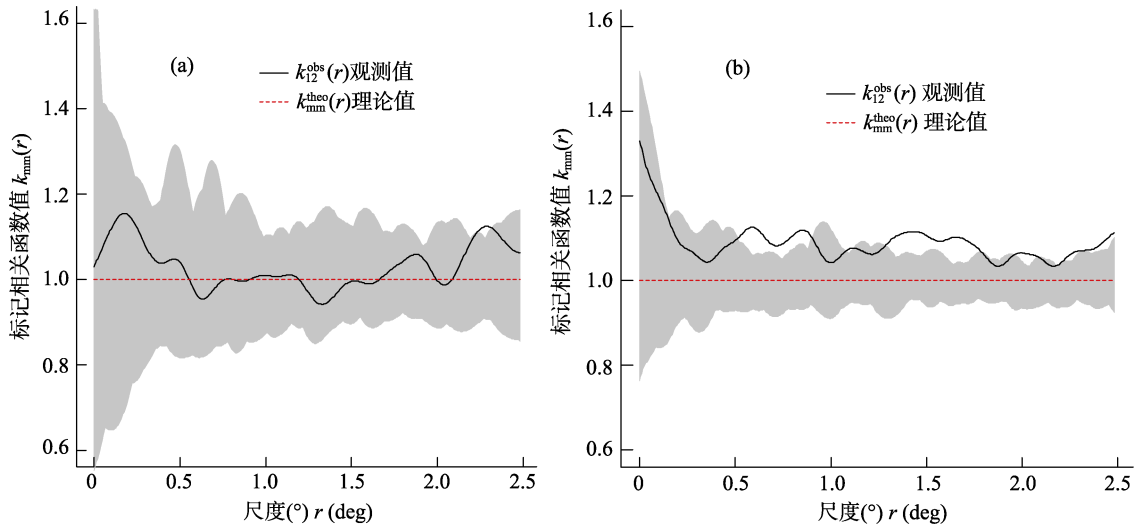


图 4 2015 年金枪鱼围网自由群鲣(a)和随附群鲣(b)围网 CPUE 的标记相关函数曲线

黑线表示数据点格局相应函数值, 灰色阴影表示用 Monte Carlo 检验的置信区间(拟合次数为 99 次, 置信水平为 99%)。

Fig. 4 The mark correlation function analysis between Unassociated school and associated school of 2015 purse seine
Black line indicates the marked correlation value for the point data; the grey shade indicates 99% simulation envelope and the number of simulated point patterns is 99.

处, 夜间则栖息于表层^[22], 小型的鲣(体长小于 45 cm)在夜间会进行长达 25~106 km 的洄游, 而于清晨回到栖息海域^[23]。鲣具有高度洄游能力。通过标记-放流-重捕的研究发现, 16%~63%的鲣会在一天内离开原先的集群加入到新的集群, 可见鲣在不同集群间的流动性非常高^[24]。

另外, 自由群在一定尺度上的随机性的空间格局特征, 可能由其生物特性决定。由于缺乏有效的营养盐供应, 太平洋海域饵料生物相对较少, 呈斑块状分布, 且促使饵料聚集的环境条件无法持久, 金枪鱼类需要根据饵料对象的动态变化而转移位置^[25]。“自由鱼群”根据饵料条件的时空变化而迁徙的行为学特性, 由于环境变化的不确定性会表现出随机性^[26-27]。相比之下, 随附鱼群集结在漂流物体周围, 移动和分布很大程度上取决于海流的走势, 因此随机性的特征并不明显。

3.2 两种点格局的相关性问题

由鲣的自由群和随附群的渔获物组成可以得知, 自由群为优势叉长为 50~60 cm 的较大的鲣, 而随附群为 40~50 cm 的鲣群体, 年龄推算大约相差 150 d^[9-10]。因此两者关系是鲣种群内的大个体群体和相对较小个体群体的关系。通过鲣的自由群和随附群的相关点格局分析发现, 在较小尺度上(小于 0.35°)表现为负相关, 两者间表现出竞争

关系; 在较大尺度上(大于 0.35°)表现为随机相关关系。两者之间没有表现出吸引关系, 说明两者之间没有捕食和协作关系。

两者在低尺度下表现为排斥竞争关系, 本研究解释为当鲣群面对食物竞争时, 在生态上会表现出种群空间分布上的负相关性, 从而有利于整个种群的发展, 因此两者竞争关系的原因在于呈“斑块”状分布且无法持久的饵料生物^[25], 鲣群需要不停地寻找这些饵料生物。

Iizuka 等^[28]在竿钓捕获的鲣的呕吐物中发现了鲣仔鱼, 认为鲣为同类相食鱼类; 但 Ankenbrandt^[29]对饵料船捕获的鲣的胃含物进行分析时, 却得出研究区域的鲣没有摄食仔鱼的现象。本研究发现由于两者之间没有吸引关系, 可以推定应该没有明显的摄食关系。

两类点事件在较大尺度下为独立的随机关系, 原因为随着尺度增大, 虽然在小尺度下为相斥关系, 但是当计算尺度增大时, 两类种群的点事件差异融合, 无法发现小尺度下两者相斥的细节, 从而表现为空间关系上的随机性。

3.3 空间标记点格局的特征

因此, 从 CPUE 的空间标记点格局结果看, 鲣自由群的 CPUE 在空间分布上为随机性(可理解为 CPUE 高为随机事件), 即相对资源密集的区域

随机分布在窗口区域内。而随附群在小尺度上表现为随机性,而在尺度 0.8° 以上, CPUE 具有一定的相关性(即高值和高值区聚集,低值和低值区聚集特性)。表现为当这个区域以尺度小于 0.8° 网格划分计算时,没有热点或冷点区域存在;当网格尺度超过 0.8° 后,随附群 CPUE 将出现相对的热点或冷点区域,而自由群没有这种情况发生。

总之,中西太平洋热带海域鲣在生命史的不同阶段,其点事件的空间分布上都是非均质的,主要表现为相互吸引的集聚式分布特征,而随机性影响较弱。聚集的原因为中西太平洋的鲣喜好生活于高温低盐的暖池东侧水域,且有永久收敛的表层水团和盐度锋面能够提供鲣群所需生物饵料;随机分布的原因为这个海域的饵料生物分布的斑块状和不可持续性,而这些斑块的出现具有随机特性,鲣高度洄游特性能够保证其跟随饵料迁徙。两者的空间格局在低尺度下表现为排斥竞争关系,在较大尺度下为独立的随机关系,它们之间的捕食关系不大可能存在。竞争关系主要由食物的有限性导致。随附群 CPUE 在相对较大尺度下有相对较弱的聚集热点和冷点区域,自由群 CPUE 在各尺度上都表现为随机关系。

参考文献:

- [1] Dubroca L, Chassot E, Floch L, et al. Seamounts and tuna fisheries: tuna hotspots or fishermen habits?[J]. Collect Vol Sci Pap ICCAT (SCRS/2012/168), 2013, 69(5): 2087–2102.
- [2] Diggle P J. Statistical Analysis of Spatial Point Patterns[M]. London: Academic Press, 1983.
- [3] Zhang J T. Analysis of spatial point pattern for plant species[J]. J Plant Ecol, 1998, 22(4): 344–349. [张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析[J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 344–349.]
- [4] Beaugrand G, Lenoir S, Ibañez F, et al. A new model to assess the probability of occurrence of a species, based on presence-only data[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2011, 424: 175–190.
- [5] Lawrence T, Baddeley A, Milne R K, et al. Point pattern analysis on a region of a sphere[J]. Stat, 2016, 5(1): 144–157.
- [6] Li K, Vandermeer J H, Perfecto I. Disentangling endogenous versus exogenous pattern formation in spatial ecology: a case study of the ant *Azteca sericeasur* in southern Mexico[J]. R Soc Open Sci, 2016, 3(5): 160073.
- [7] Lander M E, Logsdon M L, Loughlin T R, et al. Spatial patterns and scaling behaviors of Steller sea lion (*Eumetopias jubatus*) distributions and their environment[J]. J Theor Biol, 2011, 274(1): 74–83.
- [8] Bouchet P J. Submarine topography as a predictor of mobile predator hotspots: Relevance and applications to conservation planning in the pelagic ocean[D]. Perth: The University of Western Australia, 2015.
- [9] Wang S Q. Impacts of fish aggregation devices (FADs) on feeding patterns for Skipjack tunas in western and central Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015. [王少琴. 人工集鱼装置对中西太平洋鲣鱼摄食模式的潜在影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.]
- [10] Rice J, Harley S, Davies N, et al. Stock assessment of skipjack tuna in the western and central Pacific Ocean[R]. 10th Regular Session of the Scientific Committee, Working paper, Majuro, Republic of the Marshall Islands, 2014, WCPFC SC10-SA-WP-05.
- [11] Stoyan D, Stoyan H. Fractals, Random Ankenbrand Shapes and Point Fields-methods of Geometrical Statistics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [12] Wiegand T, Moloney K A. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology[J]. Oikos, 2004, 104(2): 209–229.
- [13] Ripley B D. Statistical Inference for Spatial Processes[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
- [14] Lieshout M N M, Baddeley A J. A nonparametric measure of spatial interaction in point patterns[J]. Stat Neerl, 1996, 50(3): 344–361.
- [15] Baddeley A. Analysing Spatial Point Patterns with R[M]. Australia: CSIRO, 2010.
- [16] Baddeley A, Rubak E, Turner R. Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R[M]. Canada: CRC Press, 2015.
- [17] Illian J, Penttinen A, Stoyan H, et al. Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns[M]. Berlin: John Wiley & Sons, 2008.
- [18] Baddeley A, Turner R. Spatstat: an R package for analyzing spatial point patterns[J]. J Stat Softw, 2005, 12(6): 1–42.
- [19] Lehodey P, Bertignac M, Hampton J, et al. El Niño Southern Oscillation and tuna in the western Pacific[J]. Nature, 1997, 389(6652): 715–718.
- [20] Arrizabalaga H, Dufour F, Kell L, et al. Global habitat preferences of commercially valuable tuna[J]. Deep Sea Res II, 2015, 113: 102–112.
- [21] Picaut J, Ioualalen M, Menkes C. Mechanism of the zonal displacements of the Pacific warm pool: implications for ENSO[J]. Ocean Lit Rev, 1997, 5(44): 437.
- [22] Ogura M. Swimming behavior of skipjack, *Katsuwonus pelamis*, observed by the Data Storage Tag at the North Western Pacific, off northern Japan, in summer of 2001 and 2002[R]. Queensland: 16th Meeting of the Standing Committee on Tuna and Billfish, 2003.
- [23] Sibert J, Hampton J, Fournier D A, et al. An advection- reaction model for the estimation of fish movement parameters from tagging data, with application to skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*)[J]. Can J Fish Aquat Sci, 1999, 56: 925–938.
- [24] Hilborn R. Modeling the stability of fish schools: Exchange of individual between schools of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*)[J]. Can J Fish Aquat Sci, 1991, 48: 1081–1091.
- [25] Pitcher T J. The impact of pelagic fish behaviour on fisheries[J]. Sci Mar, 1995, 59(3–4): 295–306.
- [26] Fréon P, Dagorn L. Review of fish associative behaviour: toward a generalisation of the meeting point hypothesis[J]. Rev Fish Biol Fisher, 2000, 10(2): 183–207.

- [27] Castro J J, Santiago J A, Santana-Ortega A T. A general theory on fish aggregation to floating objects: an alternative to the meeting point hypothesis[J]. *Rev Fish Biol Fish*, 2001, 11(3): 255–277.
- [28] Iizuka K, Asano M, Naganuma A. Feeding habits of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis* Linnaeus) caught by pole and line and the state of young skipjack tuna distribution in the tropical seas of the western Pacific Ocean[J]. *Bull Tohoku Reg Fish Res Lab*, 1989, 51: 107–116.
- [29] Ankenbrandt L. Food habits of bait-caught skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, from the south western Atlantic Ocean[J]. *Fish B-NOAA*, 1985, 83(3): 379–393.

Spatial distribution characters of the purse-seine skipjack fishery in the western and central Pacific based on point-pattern analysis

YANG Xiaoming^{1,2,3,4}, DAI Xiaojie^{1,2,3,4}, WANG Xuefang^{1,2,3,4}, TIAN Siqian^{1,2,3,4}

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China;
3. Collaborative Innovation Center for Distant-Water Fisheries, Shanghai 201306, China;
4. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China

Abstract: Skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) is the largest component of the tuna fishery throughout the western and central Pacific Ocean (WCPO) and it is the main targeted species in purse-seine efforts in the region. Purse-seine fleets usually operate in equatorial waters, from 10°N to 10°S, and the purse-seine fishery is classified into two set types, termed associated and unassociated sets. These set types have different spatial distribution characters. We used point-pattern analysis (PPA) to explore the relationship between the set types. PPA is an important area of spatial analysis and it is increasingly being applied to fishery-related studies. PPA can identify patterns indicative of an underlying process, and it can identify inter-point interactions, which are of primary interest in ecological studies. Using 2015 logbook data from 23 vessels belonging to Chinese fishery companies, we applied the point-pattern methods of the pair correlation function $g(r)$, cross-correlation function $J_{12}(r)$ and mark correlation function $k_{mm}(r)$, to study the spatial distribution and competing relationship of two types of skipjack schools: free (unassociated) schools and associated schools. Key results are as follows: (1) The spatial distributions of both the unassociated and associated schools of purse-seine skipjack were heterogeneous. Both showed an aggregated distribution over almost all the scales in the study windows, although the spatial patterns of the unassociated school were random at the range of 1.9–2.3 degrees scales. From this we could conclude that at two different lifespans the skipjack in WCPO both are attracted to each other and prefer to aggregate, and hence random characters were much weaker than that of the aggregated. The spatial distribution likely showed aggregated characters because skipjack prefer to inhabit the eastern part of warmer and less-salty water, where the surface water masses and salinity fronts permanently converge, thereby supporting plentiful food organisms for skipjack. The random characters were likely attributable to the patchy and random distribution of the food organisms, which could be unsustainable for skipjack; yet, in WCPO, the highly migratory skipjack are able to follow the movements of the food organisms. (2) There was a negative correlation between the unassociated and associated skipjack schools at the range of 0–0.35 degrees scales, indicating that the two types of schools are in competition within smaller scales. With increases in scale, a competitive relationship, as caused by limited food availability, possibly faded and an independent relationship appeared. We conclude that there is probably no prey relationship between the two types of skipjack schools because there were no attraction relationships at any scale. (3) The CPUE marked point patterns showed a positive correlation with the spatial distribution of associated schools at the scale of more than 0.8 degrees, thus revealing windows of ‘hot spots’ and ‘cold spots’; meanwhile, only random relationships were identified at the other scales. The CPUE marked point patterns showed a random relationship with the spatial distribution of unassociated schools at any scale.

Key words: purse seines; *Katsuwonus pelamis*; spatial patterns; point-pattern analysis; mark correlation function; western and central Pacific Ocean

Corresponding author: DAI Xiaojie. E-mail: xjdai@shou.edu.cn