

文章编号: 1000-0615(2018)08-1220-09

DOI: 10.11964/jfc.20170510837

赤道太平洋中部围网自由群的空间点模式的影响因子

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

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学远洋渔业协同创新中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;

4. 上海海洋大学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: 赤道太平洋中部是我国围网渔船主要作业的海域之一, 对围网自由群资源分布的影响因子的掌握非常重要。根据我国围网船队2015年渔捞日志, 以空间点密度作为资源丰度的指标, 选取几个相对重要因子(离岸距离、混合层深度、海表温度和净初级生产力), 采用相对密度估计和点过程模拟方法, 计算各因子对自由群资源密度的影响曲线和资源密度最优回归方程。结果显示, (1)围网自由群栖息偏好环境: 离岸距离为70~250 km, 海表温度为29.7~30.1 °C, 混合层深度为35.5~42 m, 净初级生产力为200~280 mg C/(m²·d)。(2)资源密度在离岸距离为0~70 km之间快速上升, 70~250 km保持小幅上升, 离岸距离大于250 km后资源密度平稳下降; 资源密度在海表温度为28.5~29.8 °C, 随着海表温度增加而增加, 而30.2~31.5 °C之间随机分布; 净初级生产力为150~280 mg C/(m²·d), 资源密度随之增加, 而净初级生产力大于280 mg C/(m²·d)后资源密度下降; 在混合层深度为30~37 m间为正相关上升, 在37~51 m为负相关。(3)对资源密度贡献的重要性因子排列顺序依次为离岸距离>净初级生产力>混合层深度>海表温度。

关键词: 围网; 自由群; 点模式; 点过程模拟; 赤道太平洋中部

中图分类号: S 932.2

文献标志码: A

赤道太平洋中部是我国围网渔船主要作业的海域之一, 围网中心渔场会随着海洋环境变化做大范围的以年际和年代际为周期的空间变动^[1]。目前, 我国金枪鱼(*Thunnus thynnus*)围网渔获中自由群占比30%左右, 但随着中西太平洋渔业委员会对人工集鱼装置愈加严厉的限制^[2-3], 提升自由群的捕捞努力量比例是未来的趋势。目前, 研究海洋环境因子与渔场或渔业资源关系时, 常以单位捕捞努力量产量(CPUE)或捕捞努力量(Efforts)为指标代表资源丰度^[4]。方法上使用广义线性模型(GLM)、广义加性模型(GAM)和栖息地指数(HSI)等方法, 获取其与环境变量的拟合曲线关系^[5-11]。但这些研究方法对围网自由群资源分析可能存在一定的缺陷。在围网作业

下, 自由群主要由鲣(*Katsuwonus pelamis*)和黄鳍金枪鱼(*T. albacares*)的纯群或混合群组成^[12-13], 二者均是世界上游速最快的鱼种之一^[14]。围捕自由群时, 因鱼群游动快速, 难于捕获, 投网有较高的空网率。同时由于投网成本大, 每次投网均需要寻鱼, 达到一定集群规模才会投网^[14-16]。且实际渔获率与人为因素和海况(风速、海流等)有密切关系^[16-18], 这些致使渔获率很难反映资源量, 尤其是具有高空网率的自由群。虽然可采用如CPUE标准化等方法来剔除部分无关因素的影响^[3, 19-20], 但实际生产中, 重要环境变量和资源量之间无显著关系的情况常有发生。因此, 本研究以空间点密度代替CPUE或者Efforts作为因变量, 采用空间点模式的相关分析和拟合回

收稿日期: 2017-05-11 修回日期: 2017-10-12

资助项目: 国家自然科学基金(41506151); 国家远洋渔业工程技术研究中心开放基金(A1-0203-00-2007-2)

通信作者: 田思泉, E-mail: sqtian@shou.edu.cn

归分析, 以一种新的方法和视角对影响金枪鱼围网自由群空间点模式的因子进行相关分析。本研究拟解决的问题包括(1)通过点模式确定影响围网自由群空间点模式的因素; (2)通过点模式拟合最佳相关模型确定各因子对点密度的贡献。本研究对金枪鱼围网渔业中自由群渔场的开发利用具有重要参考意义。

1 材料与方法

1.1 实验数据

渔业数据 研究数据来源于我国渔业公司2015年围网渔船的渔捞日志数据, 包括作业日期、经纬度、各鱼种产量及投网类型等。金枪鱼围网生产根据鱼群集群类型划分为自由群和随附鱼群(包括流木群和人工集鱼装置群), 本研究选取作业类型为自由群类型, 所有投网作业点全部作为空间点过程的事件。点模式分析方法需要假定空间采样的随机性, 同时, 中西太平洋海域有在公海限制围网作业的规定, 因此本研究区域定义在热带太平洋中部海域——瑙鲁和基里巴斯(吉尔伯特群岛)的专属经济区内(图1, 图中数值表示在一个单位经纬度范围内采样点出现的次数)。

环境数据 环境资料选取对围网渔业中的鱼类生活习性直接相关及容易观测和获取的

参数为目标, 主要包括离岸距离、海表温度、净初级生产力和混合层深度, 并通过日志数据的年、月和位置, 获取点事件相应的环境因子数据。

岛屿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/>]。通过计算投网点离岛屿岸线的最近距离获得离岸距离值。

海表温度数据(sea surface temperature, SST)来自美国国家宇航局(NASA)的MODIS Aqua数据[<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>], 空间分辨率9 km, 时间分辨率为月。

混合层深度(mixed layer depth, MLD)数据和净初级生产量[net primary production, NPP, 单位为 $\text{mg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]来自美国俄勒冈州立大学Ocean Productivity网站[<http://www.science.oregonstate.edu/>], 其中NPP数据是基于MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer)资料及VGPM (vertically generalized production model)反演算法的数据, 代表有光层的总初级生产力数据。二者空间分辨率9 km, 时间分辨率为月。

1.2 实验方法

空间点过程密度与环境关系 点模式分析通常采用空间条件密度来描述空间点的空间分布^[21]。通过空间变量点过程密度与泊松模型(即CSR)的相对强度计算, 以期待发现空间变量

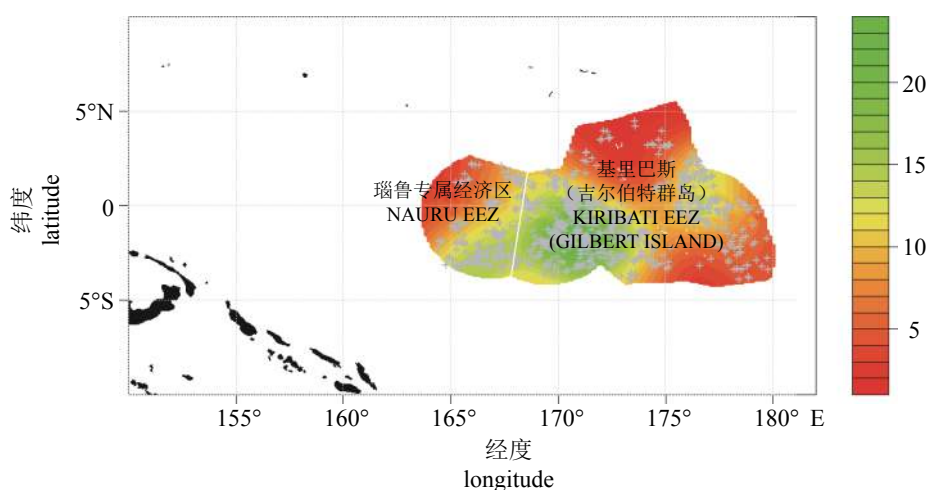


图1 2015年赤道中部太平洋海域围网自由群点过程核密度分布

灰色“+”为实际自由群下网点

Fig. 1 The kernel-smoothed density in Equatorial Central Pacific Ocean of the free school distribution from Chinese purse seine fleets of 2015

The gray “+” markers are the locations of free school set

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 ,

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

其中 $\lambda(u)$ 为点过程的密度, $Z(u)$ 为对应的相关变量的值, $\rho[Z(u)]$ 是相关变量的相对于 $\lambda_0(u)$ 模型的比值,本研究中 $\lambda_0(u)$ 为随机分布模型——泊松模型^[22-23]。

环境因子的离差标准化处理 在使用环境因子对点过程模型进行拟合时,采用离差标准化方法对各因子做线性变换处理,各因子映射在 $[0, 1]$ 之间。经过标准化处理后,由于变量范围一致,因此,获得的最优模型中的变量系数即可代表该变量对资源密度值的贡献大小。系数的绝对值越大则对资源的影响越大。

点过程模型的拟合 根据环境因子和点过程密度的关系,获取基于环境因子的点过程模型函数。该方法基于最大似然估计的对数线性泊松回归算法,采用GLM方法拟合空间点过程密度和各因子关系的函数^[24-25]。

以金枪鱼集群空间分布遵循各向异性泊松模型,点过程线性对数密度函数为因变量,其对应的离岸距离、净初级生产力、混合层深度和海表温度等环境因子为自变量。

$$\log(intensity) \sim \text{polynom}(npp, 2) + \text{polynom}(mld, 2) + \text{polynom}(dis, 2) + \text{polynom}(sst, 2) \quad (2)$$

式中 npp 为净初级生产力项NPP, mld 为混合层深度项MLD, dis 为离岸距离项DIS, sst 为海表温度项SST,这些因子都是标准化处理后的结果。

采用AIC标准确定最优模型。以确定有显著性的影响因子和入选因子的系数值。此系数可以表示各因子对模型的相对贡献大小指标。

本研究中的数据处理和分析均在R语言平台完成,点过程的相关分析和点模式模型拟合在spatstat模块中实现,具体方法参照已有文献^[24-25]。

2 结果

2.1 空间点模式密度特征

由自由群的投网点构成的点模式,其条件核密度估计结果图发现,虽然单次围网自由群的发生是随机的,但从大的时空尺度观察,其发生具有明显的聚集性特征;自由群的资源丰

度出现了2个“热点”(绿色或偏绿区域)和3个“冷点”海域(北部、西北和东南3个红色区域)(图1)。

2.2 各变量对点密度分布影响

选取了对围网渔业有明显影响的“离岸距离”和“海洋环境因子——海表温度、净初级生产力和混合层深度”。计算空间点过程与各环境变量的关系,由离岸距离效应可见,在0~70 km,点过程密度快速增加,250 km之后,点过程快速减少;70~250 km,点过程密度相对较为稳定(图2-a)。净初级生产力对点过程密度影响结果显示,净初级生产力范围位于150~300 mg C/(m²·d);150~280 mg C/(m²·d)之间表现为点密度随着净初级生产力增加,而后为负相关(图2-b)。海表面温度效应分布结果显示,自由群主要分布在29~31.5 °C;从28.5~29.8 °C,点密度随着SST增加而增加;在29.7~30.1 °C为点过程聚集区域,即适宜的栖息温度区域;30.2 °C之后,分布上为随机性特征,即在相对强度为1上下波动(图2-c)。混合层深度对点过程密度影响结果显示,混合层深度范围为30~60 m;深度30~37 m为上升区间,37~51 m为下降区间;其中35.5~42 m为栖息偏好区域(图2-d)。

2.3 基于环境因子空间点过程模拟

由于各因子的标准化后值域均为 $[0, 1]$,因此各因子系数的绝对值可以反映出点密度的贡献。从因子系数的绝对值大小观察,对资源密度贡献的重要性顺序依次为离岸距离>净初级生产力>混合层深度>海表温度。并且,从模型结果中发现,资源密度与混合层深度和离岸距离项都为二次函数的负相关,而自由群资源密度会随着温度和净初级生产力的增加而更丰富。

资源密度的回归方程:

$$\log(intensity) = -16.451 2 \times (dis - 0.261 0)^2 + 1.874 5 \times npp + 0.375 3 \times sst - 0.826 0 \times (mld - 0.582 9)^2 + 1.352 5 \quad (3)$$

变量名的含义同式(2),表1和式(3)的自变量都为离差标准化后的数据。

3 讨论

3.1 离岸距离和点模式密度关系

从点模式模拟结果分析,离岸距离是高度

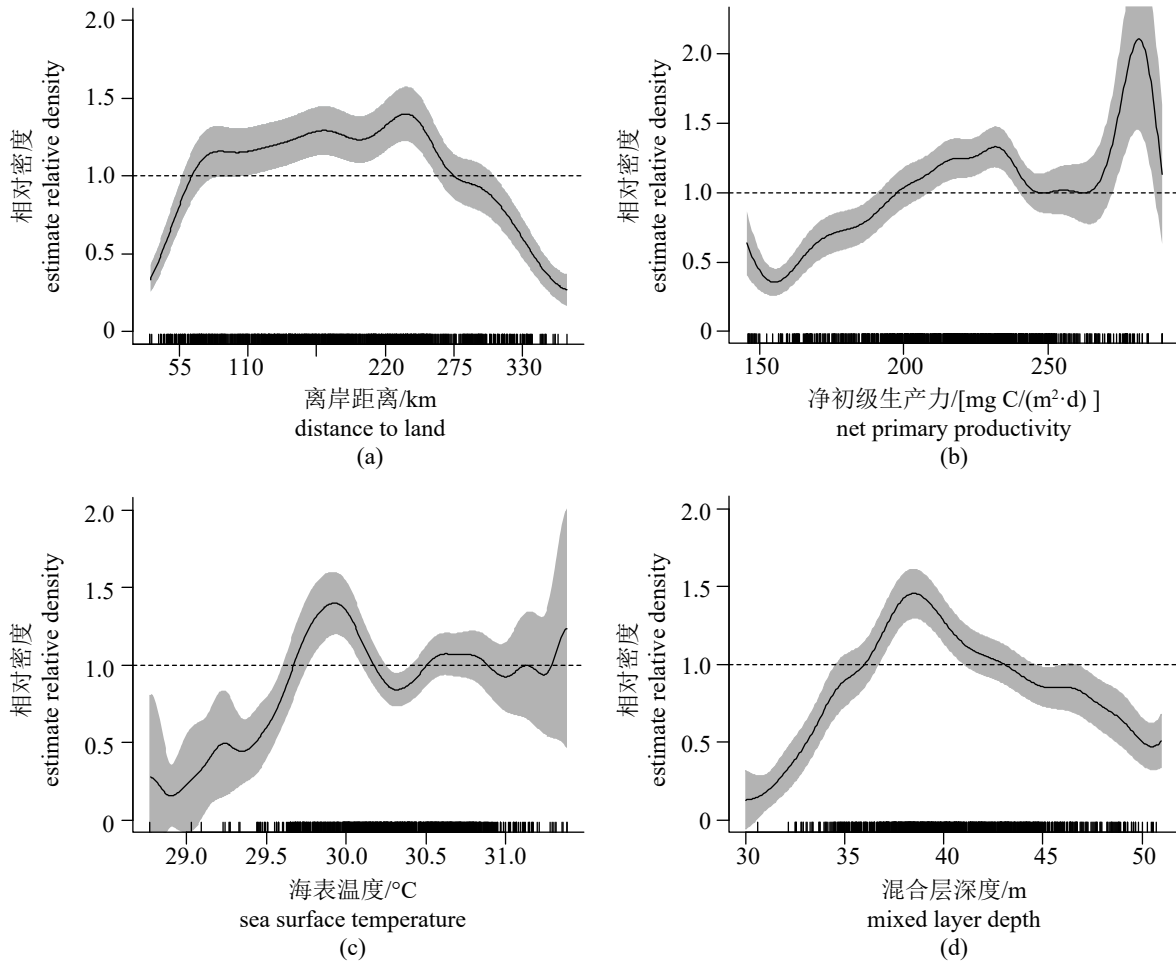


图 2 相关环境变量点过程密度估计与泊松模型比值

图中虚线相对强度 $\rho = 1.0$ 对应为泊松模型, 阴影区为95%的置信区间(a~d依次为离岸距离、净初级生产力、海水表温和混合层深度的关系)

Fig. 2 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 are pointwise 95% confidence band (a-d in sequence is distance to land, NPP, SST and MLD, respectively)

表 1 自由群的资源密度点格局模型及其系数

Tab. 1 The spatial point pattern model and its coefficients of free school

变量项 variables	方程项 equation	系数 coefficient	贡献log(intensity)值 max effect for log(intensity)
截距 intercept	1	1.352 5	
离岸距离 dis	$(dis-0.261 0)^2$	-16.451 2	-8.984 3*
净初级生产力 npp	npp	1.874 5	1.874 5
混合层深度 mld	$(mld-0.582 9)^2$	-0.826 0	-0.280 7*
海水温度 sst	sst	0.375 3	0.375 3

注: “*”负值表示方向; 贡献值计算方法: 系数 \times max(方程项)
Notes: “*” negative values indicate direction; contribution value calculation method is coefficient value multiplied by maximum value of equation

显著性影响因子。自由群空间点密度与离岸距离间的关系在70 km之前为负相关关系, 本研究推测应该是人为因素影响的结果, 之前围网研究中未见报告。在太平洋赤道海域, 表层海水中缺乏营养盐^[26], 通常离岸越近, 相对初级生产力越高, 渔业资源丰度也相对较高, 但近岸密集分布着当地的杆钓、小型曳绳钓船队等, 这些当地船队的船长通常小于7 m, 且渔船数目较多, 一年内有近5 000条渔船在此活动^[27], 不利于大型金枪鱼围网渔业捕捞作业开展。此外, 密集区域集中在70~250 km, 与该水域海流系统消长密切相关。当强盛的海流通过岛屿的周围时, 促使该海域产生中层水的涌升现象, 导致海水温跃层的提升而形成良好渔场的潮间带海

洋特殊条件^[28-29]。通过对海底地形图观察和2015年该海域海流的观察,发现为向东海流,而基里巴斯—吉尔伯特群岛呈南北走向,以海岛和海山的形式密集连续分布,有利于形成涌升海流,推测这可能是导致该海域的资源丰度热点出现在岛链西侧的原因。

3.2 混合层和点模式密度关系

混合层深度除了控制海洋与大气的能量交换外,也影响了有光层浮游动物的成长速率^[30],且对栖息于混合层的鳀造成垂直分布的限制^[31]。混合层深度对自由群点过程的密度有影响,严国维^[32]采用GAM方法分析2000—2012年中国台湾围网船队在中西太平洋的鳀产量数据,发现MLD介于20~60 m(本研究的自由群主要分布在30~60 m);其中35~45 m渔获努力量相对较高,这与本研究35.5~42 m偏好密集区域基本相同;随着MLD增加,CPUE会随着增加。

3.3 海表温度和点模式密度关系

围网自由群主要组成为鳀和黄鳍金枪鱼,都属于暖水性金枪鱼鱼种,喜好在热带海域高温区域,对水温非常敏感^[29],喜好栖息于中西太平洋暖水团内东侧^[33],该暖水团边界标记温度为29 °C^[1],此温度线可作为渔场移动标记线^[1, 34]。结合严国维^[32]的研究发现,在冷舌区(SST在27.5~29 °C)对围网CPUE的影响是负面的。本研究发现自由群的资源密度与海表温度关系:其在冷舌内(27.5~29 °C)为负相关^[32],冷舌-暖池过渡区(29~30 °C)为正相关,在暖池(30 °C以上)为随机分布特征;并且在30 °C附近(29.7~30.1 °C)有一个狭窄的栖息偏好温度。鳀的热点区域在30~31 °C^[33],SST在此区间与CPUE正相关^[35]。

3.4 初级生产力和点模式密度关系

在中太平洋热带海域,一些研究认为影响鳀分布的首要因素是饵料^[36],鳀栖息的暖池是典型的缺乏初级生产力的海域^[37]。食物因素在这个海域十分关键,自由群跟随饵料索饵或者溯潮流而游动^[33]。有报道认为,该海域生物量和初级生产力有正向作用^[38]。本研究结果分析,资源点密度和净初级生产力为正相关关系,而且是最重要的环境因子(表1)。通过多年SeaWiFS卫星图像分析,认为中太平洋海域,在正常年份和拉尼娜年,叶绿素浓度来源与东太平洋涌升流输

送,而在厄尔尼诺年,饵料生物来自西太平洋,随着暖池向中太平洋赤道海域输送。2015年为强厄尔尼诺年,通过观察2015年各月叶绿素卫星图像可发现,表层叶绿素也主要来自西太平洋海域的输送^[34]。Chen等^[7]认为当净初级生产力过高[大于350 mg C/(m²·d)]或过低[低于200 mg C/(m²·d)]时,对于CPUE会有负面影响,250~300 mg C/(m²·d)时,捕捞努力量相对较高。这与本研究结论“渔业资源在280 mg C/(m²·d)以下,为正相关关系,而之后为负相关”的结果存在一些差异。主要原因为本研究只采用了围网自由群数据,而文献^[7]为全部的围网鳀鱼群(主要包括自由群和流木群)数据。

点模式方法属于统计方法理论在空间点数据的实践应用,通过对空间点模式中这些空间点组合特征的统计分析,能够揭示一些重要的生态学特征与关系。点模式方法是一种基于已存数据分析物种间关系的模型手段^[39],在较大尺度如全球中的某局部区域下^[40],可用于探讨种群空间模式形成^[41],以及和环境之间的关系研究中^[42]。近年来该方法在海洋生态领域开始应用,如点模型方法用于研究海山和金枪鱼渔业分布和热点的关系^[43],海狮分布的空间模式与环境的关系^[41],海底地形和捕食动物分布热点的关系^[44]。

对于围网自由群而言,捕捞努力量数据是一个包含许多因素综合作用的结果^[45],在与渔场关系的研究中,实际效果要优于CPUE数据得出的结果^[32],本研究中采用的点密度函数值与捕捞努力量有一定类似,空间点模式研究方法采用点密度为原始点数据,无需格网化处理,对于分析其空间距离项而言,详细的信息不会被平滑过滤掉而导致数据失真。

根据生产数据、环境资料获得的点模式分布回归函数,既可用于对缺乏空间细节的历史数据的空间模拟,也可以用于对未来气候环境下的渔业资源分布的空间模拟。

围网自由群分布在整个太平洋海域,且高度洄游,而本研究由于资料(仅限中国船队资料)、空间范围和选取的环境因子有限,以上各方面都需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Hampton J, Harley S. Assessment of the potential implication of application of CMM-2008-01 for bigeye and yellowfin tuna[C]//5th Western and Central Pacific Fisheries Commission. Port Vila, Vanuatu: Scientific Committee Regular Session, 2009.
- [3] Langley A, Hampton J. Spatial temporal patterns of purse seine catches of skipjack and juvenile bigeye and yellowfin tuna caught in association with floating objects[C]//3rd Western and Central Pacific Fisheries Commission. Honolulu, United States of America, Samoa: Scientific Committee Regular Session, 2007.
- [4] Tian S Q, Chen X J, Chen Y, *et al.* Evaluating habitat suitability indices derived from CPUE and fishing effort data for *Ommastrephes bratramii* in the northwestern Pacific Ocean[J]. *Fisheries Research*, 2009, 95(2-3): 181-188.
- [5] Wood S N, Augustin N H. GAMs with integrated model selection using penalized regression splines and applications to environmental modelling[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2-3): 157-177.
- [6] Chen X J, Li G, Feng B, *et al.* Habitat suitability index of Chub mackerel (*Scomber japonicus*) from July to September in the East China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 2009, 65(1): 93-102.
- [7] Chen X J, Tian S Q, Chen Y, *et al.* A modeling approach to identify optimal habitat and suitable fishing grounds for neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific Ocean[J]. *Fishery Bulletin*, 2010, 108(1): 1-14.
- [8] Yen K W, Lu H J. Spatial-temporal variations in primary productivity and population dynamics of skipjack tuna *Katsuwonus pelamis* in the western and central Pacific Ocean[J]. *Fisheries Science*, 2016, 82(4): 563-571.
- [9] Yen K W, Lu H J, Chang Y, *et al.* Using remote-sensing data to detect habitat suitability for yellowfin tuna in the Western and Central Pacific Ocean[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(23): 7507-7522.
- [10] Lu H J, Kao S C, Cheng C H. Relationships between CPUE fluctuation of southern bluefin tuna and ocean temperature variability in the Central Indian Ocean[J]. *Fisheries Science*, 2008, 74(6): 1222-1228.
- [11] Lynch P D, Shertzer K W, Latour R J. Performance of methods used to estimate indices of abundance for highly migratory species[J]. *Fisheries Research*, 2012, 125-126: 27-39.
- [12] SPC (Secretariat of the Pacific Community). Technical aspects of tuna purse seine operations[C]//Twenty First Regional Technical Meeting on Fisheries of South Pacific Commission. Noumea, New Caledonia: SPC, 1989.
- [13] SPC (Secretariat of the Pacific Community), OFP (Oceanic Fisheries Programme). Estimates of annual catches in the WCPFC statistical area[C]//10th Western and Central Pacific Fisheries Commission. Noumea, New Caledonia: Scientific Committee Regular Session, 2014. (WCPFC-SC10-2014/ST IP-1) .
- [14] Dagorn L, Holland K N, Hallier J P, *et al.* Deep diving behavior observed in yellowfin tuna (*Thunnus albacares*)[J]. *Aquatic Living Resources*, 2006, 19(1): 85-88.
- [15] Ye X C, Xu L X. Observation of Chinese tuna purse seine fishery in the WCPFC waters during 2006-2007[C]//3rd Western and Central Pacific Fisheries Commission. Honolulu, United States of America: Scientific Committee Regular Session, 2007.
- [16] 王学昉, 许柳雄, 周成, 等. 中西太平洋金枪鱼围网鳀鱼自由鱼群捕获成功率与温跃层特性的关系[J]. *上海海洋大学学报*, 2013, 22(5): 763-769.
Wang X F, Xu L X, Zhou C, *et al.* The relationship between the thermocline features and the rate of fishing success for free school caught by the tuna purse seiner in the Western and Central Pacific Ocean[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013, 22(5): 763-769(in Chinese).
- [17] 王学昉, 许柳雄, 官文江, 等. 金枪鱼围网沉降性能对自由鱼群捕获率的影响[J]. *中国水产科学*, 2014, 21(5): 1048-1055.
Wang X F, Xu L X, Guan W J, *et al.* The relationship between purse seine sinking performance and fishing success for free swimming tuna schools[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, 21(5): 1048-1055(in Chinese).
- [18] Inada H, Sekine J, Kim H S, *et al.* The influence of environmental conditions on fish catches during purse seining operations for skipjack *Katsuwonus pelamis* and yellowfin tuna *Thunnus albacares* in the western tropical Pacific fishing grounds[J]. *Journal of Tokyo University of Fisheries*, 1997, 83(1-2): 129-138.
- [19] Maunder M N, Punt A E. Standardizing catch and effort

- data: a review of recent approaches[J]. *Fisheries Research*, 2004, 70(2-3): 141-159.
- [20] 杨胜龙, 张禹, 张衡, 等. 不同模型在渔业CPUE标准化中的比较分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 259-264.
- Yang S L, Zhang Y, Zhang H, *et al.* Comparison and analysis of different model algorithms for CPUE standardization in fishery[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(21): 259-264(in Chinese).
- [21] Diggle P J. *Statistical Analysis of Spatial Point Patterns*[M]. 2nd ed. London, UK: Arnold, 2003.
- [22] 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.
- [23] 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, 2006.
- [24] Baddeley A. *Analysing Spatial Point Patterns in R. Version 4.1*[R]. Perth, Australia: CSIRO and University of Western Australia, 2010.
- [25] Baddeley A, Rubak E, Turner R. *Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R*[M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015.
- [26] Radenac M H, Messié M, Léger F, *et al.* A very oligotrophic zone observed from space in the equatorial Pacific warm pool[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134: 224-233.
- [27] Ministry of Fisheries and Marine Resources Development KIRIBATI. Annual report to the commission part 1: information on fisheries, research and statistics[C]//11th Western and Central Pacific Fisheries Commission. Pohnpei, Federated States of Micronesia: Scientific Committee Regular Session, 2015. (WCPFC-SC11-AR/CCM-11).
- [28] Morato T, Hoyle S D, Allain V, *et al.* Seamounts are hotspots of pelagic biodiversity in the open ocean[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(21): 9707-9711.
- [29] Block B A, Keen J E, Castillo B, *et al.* Environmental preferences of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) at the northern extent of its range[J]. *Marine Biology*, 1997, 130(1): 119-132.
- [30] Ryan J P, Polito P S, Strutton P G, *et al.* Unusual large-scale phytoplankton blooms in the equatorial Pacific[J]. *Progress in Oceanography*, 2002, 55(3-4): 263-285.
- [31] Bigelow K A, Boggs C H, He X. Environmental effects on swordfish and blue shark catch rates in the US North Pacific longline fishery[J]. *Fisheries Oceanography*, 1999, 8(3): 178-198.
- [32] 严国维. 气候变迁对中西太平洋正鲣资源及渔获潜能影响之评估[D]. 中国台湾: 台湾海洋大学, 2016.
- Yen K W. Evaluate the influence of climate change on skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) stock and its catch potential in the Western and Central Pacific Ocean[D]. Taiwan, China: Taiwan Ocean University, 2016 (in Chinese).
- [33] Picaut J, Ioualalen M, Menke C, *et al.* Mechanism of the zonal displacements of the Pacific warm pool: implications for ENSO[J]. *Science*, 1996, 274(5292): 1486-1489.
- [34] 黄易德. 中西太平洋正鲣资源时空分布特性的研究[D]. 中国台湾: 台湾海洋大学, 2002.
- Huang Y D. A study on the spatio-temporal distribution of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) stock in Western and Central Pacific Ocean[D]. Taiwan, China: Taiwan Ocean University, 2002 (in Chinese).
- [35] 杨晓明, 戴小杰, 田思泉, 等. 中西太平洋鲣鱼围网渔业资源的热点分析和空间异质性[J]. *生态学报*, 2014, 34(13): 3771-3778.
- Yang X M, Dai X J, Tian S Q, *et al.* Hot spot analysis and spatial heterogeneity of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) purse seine resources in the western and central Pacific Ocean[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13): 3771-3778(in Chinese).
- [36] Sparre P, Venema S C. *Introduction to tropical fish stock assessment: Part 1 Manual*[R]. FAO Fisheries Technical Paper No. 306/1 Rev.2. Rome: FAO, 1998.
- [37] Longhurst A, Sathyendranath S, Platt T, *et al.* An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data[J]. *Journal of Plankton Research*, 1995, 17(6): 1245-1271.
- [38] Mcowen C J, Cheung W W L, Rykaczewski R R, *et al.* Is fisheries production within large marine ecosystems determined by bottom-up or top-down forcing?[J]. *Fish and Fisheries*, 2015, 16(4): 623-632.

- [39] 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]. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, 424: 175-190.
- [40] 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.
- [41] 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]. *Royal Society Open Science*, 2016, 3(5): 160073.
- [42] 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]. *Journal of Theoretical Biology*, 2011, 274(1): 74-83.
- [43] Dubroca L, Chassot E, Floch L, *et al.* Seamounts and tuna fisheries: tuna hotspots or fishermen habits?[C]// Proceedings of 2012 Inter-sessional Meeting of the Tropical tuna Species Group. ICCAT, Madrid, Spain, 2014: 2087-2102.
- [44] 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.
- [45] McCluskey S M, Lewison R L. Quantifying fishing effort: a synthesis of current methods and their applications[J]. *Fish and Fisheries*, 2008, 9(2): 188-200.

The influence factors of spatial point patterns of purse seine free school in the Central Equatorial Pacific Ocean

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

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

2. Collaborative Innovation Center for Distant-water Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: There is one of the main areas of Chinese purse seine in the Central Equatorial Pacific Ocean. The fishing efforts for the free school fish stocks will be the trend of purse seine. To understand the environmental factors, which would affect the distribution of free school stock, is becoming more and more important. The free school stock is harder to catch than other types of fish, and the rate of failing sets is very high. This paper replaces the Catch per unit effort(CPUE)with the spatial points density as the index of stock abundance. The density of spatial points is treated as response variable, and we try to find out some significant variables from environmental factors based on the logbooks of Chinese Purse Seine fleets in 2015. Some factors are obtained as independent variables based on our experience or research articles, these variables are respectively: the distance to land (DIS), sea surface temperature (SST), net primary production (NPP) and mixed layer depth (MLD). First, the nonparametric estimate to these factors are calculated from relative covariate intensity function (*rho*hat) method. Second, using point process model (*ppm*) function of these factors, the intensity regression equation is given. The results show that: (1) The favorite environmental range of these variables, are 70–250 km in DIS, are 29.7–30.1 °C in SST, are 200–280 mg C/(m²·d) in NPP, and are 35.5–42 m in MLD, respectively. (2) There are positive relationships between the free school stock abundance with DIS within 0–70 km, SST within 28.5–29.8 °C, NPP within 150–280 mg C/(m²·d), and MLD within 30–37 m, while there are negative relationships between the free school stock abundance with DIS above 250 km, NPP above 280 mg C/(m²·d), MLD above 37 m. And there are a random relationship between the free school stock abundance with SST above 30.2 °C. (3) We get the optimal free school stock abundance regression equation of these factors through stepwise regression based on the AIC method. Among the environment factors that influenced the free school stock abundance, the order of importance factor is DIS>NPP>MLD>SST.

Key words: purse seine; free school; spatial point pattern; point process model fitting; Central Equatorial Pacific Ocean

Corresponding author: TIAN Siquan. E-mail: sqtian@shou.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (4150615); Open Funding for National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries (A1-0203-00-2007-2)