

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20220321001

http://www.yykxjz.cn/

杨超, 张衡, 韩海斌, 赵国庆, 石永闯, 徐博, 蒋沛雯, 严云志, 葛雅丽. 北太平洋远东拟沙丁鱼渔场时空分布及其最适环境特征. 渔业科学进展, 2023, 44(4): 99–110
YANG C, ZHANG H, HAN H B, ZHAO G Q, SHI Y C, XU B, JIANG P W, YAN Y Z, GE Y L. Spatio-temporal distribution of *Sardinops sagax* in the North Pacific: Optimal environmental characteristics. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(4): 99–110

北太平洋远东拟沙丁鱼渔场时空分布 及其最适环境特征*

杨超^{1,2} 张衡^{1,2,3①} 韩海斌^{1,2} 赵国庆^{1,2}
石永闯^{1,2} 徐博⁴ 蒋沛雯^{2,5} 严云志⁵ 葛雅丽⁵

(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. 长江三角洲河口湿地生态系统教育部/上海市野外科学观测研究站 上海 202162; 4. 中国极地研究中心 上海 201209; 5. 安徽师范大学生态与环境学院 安徽 芜湖 241000)

摘要 基于2019—2020年北太平洋灯光敷网渔业数据和海表温度、叶绿素、海面高度等环境数据,采用空间叠加图、频次分析与经验累积分布函数、K-S检验和GAM模型4种方法分析了远东拟沙丁鱼(*Sardinops sagax*)渔场的单位捕捞努力量(CPUE)时空分布特征及与关键环境因子的相关关系。分析结果显示,作业渔场重心分布范围为147°~153°E、39°~43°N,在4—8月向东北方向移动,9—11月则向西南方向折返。通过频次分析与经验累积分布函数分析,中心渔场区域最适海表温度为10.0~18.0℃,最适叶绿素浓度为0.2~0.6 mg/m³,最适海面高度为0.2~0.7 m。K-S检验分析表明,高值CPUE海域和海表温度、叶绿素浓度、海面高度均有密切关系,最适范围分别为10.9~18.9℃、0.2~0.6 mg/m³、0.2~0.7 m。GAM模型模拟结果表明,高值CPUE的最适海表温度为11.0~17.0℃,最适叶绿素浓度为0.3~0.8 mg/m³,最适海面高度为0.1~0.4 m。综合来说,CPUE高值区海域的最适海表温度为11.0~18.0℃,叶绿素浓度为0.2~0.6 mg/m³,海面高度为0.2~0.7 m。

关键词 北太平洋公海; 远东拟沙丁鱼; 海洋环境因子; GAM模型

中图分类号 S931.4 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2023)04-0099-12

远东拟沙丁鱼(*Sardinops sagax*)作为一种暖温性小型中上层鱼类,其集群性强,是世界上渔获量较高的中上层鱼类之一(韦晟等,1989)。北太平洋远东拟沙丁鱼主要分布于中国、日本、俄罗斯沿海及附近公海海域(胡雅竹等,1993)。日本在20世纪20年代开始进行远东拟沙丁鱼的商业捕捞,我国在20世纪80年代开始相关渔业资源的开发(王明彦等,1992)。近些年来,我国

在北太平洋公海的远洋渔业稳步发展,主捕鱼种为日本鲭(*Scomber japonicus*)、远东拟沙丁鱼、柔鱼(*Ommastrephes bartrami*)和秋刀鱼(*Cololabis saira*) (马超等,2018)。

远东拟沙丁鱼渔场历史上经历过数次大的变动,其产量极不稳定,最显著的是1965—1980年间,其产量最高可达百万吨,而最低时产量不足万吨(管锡弟等,

* 国家重点研发计划(2019YFD0901405)、中国水产科学研究院东海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2021M06)、长江三角洲河口湿地生态系统教育部/上海市野外科学观测研究站开放基金(K202001)和浙江省远洋渔业资源探捕项目(CTZB-2021070657)共同资助。杨超, E-mail: 243353707@qq.com

① 通信作者: 张衡, 副研究员, E-mail: zhangziqian0601@163.com

收稿日期: 2022-03-21, 收修改稿日期: 2022-04-14

1985)。目前,极少有关于北太平洋远东拟沙丁鱼与海洋环境因子之间关系的研究报道,仅在食品加工和生理学方面有少量报道(李亚会等, 2021; 李锐等, 2019)。关于远东拟沙丁鱼的渔场与海洋环境的关系, 仅见徐博等(2020)对北太平洋的渔获物组成及渔场时空的研究中有所涉及。根据中国远洋渔业协会统计, 近些年来, 北太平洋远东拟沙丁鱼的产量逐渐上升, 2020年其产量已超过灯光敷网渔业总渔获量的50%。北太平洋渔业委员会(North Pacific Fisheries Commission, NPFC)将其列为优先评估鱼种, 准备开展其资源评估与管理的工作(Nippon Suisan Gakkaishi, 2016)。因此, 探讨北太平洋远东拟沙丁鱼的渔场时空分布及其最适环境特征的影响对于提高我国北太平洋公海渔业的捕捞效率及渔业资源的科学管理具有重要现实意义。

为可持续利用北太平洋远东拟沙丁鱼资源, 本研究采用2019—2020年我国在北太平洋渔业生产数据, 结合卫星遥感的海表温度、叶绿素浓度、海面高度数据, 分析远东拟沙丁鱼渔场时空分布及其最适环境特征的影响, 从而为该渔业资源的合理利用和我国在NPFC制定管理政策提供数据支撑与依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

远东拟沙丁鱼渔业数据来自于我国公海拖围网渔业生产数据库的灯光敷网船生产作业数据, 包括作业时间、作业位置、日产量和作业网次数。时间范围为2019—2020年的渔汛期4—11月, 渔场范围为

39°~43°N、147°~153°E(图1)。

海表面温度(sea surface temperature, SST)、海面高度(sea surface height, SSH)数据来自于CMEMS(copernicus.eu)网站的再分析数据, 叶绿素浓度(chlorophyll-*a*, Chl-*a*)数据来自<https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/index.html>网站的Aqua卫星, 时间范围均为2019—2020年, 其中, SST与SSH的空间分辨率为0.25°×0.25°, Chl-*a*空间分辨率为0.025°×0.025°。使用ArcGIS10.6软件进行重采样, 将空间分辨率为0.025°×0.025°的环境数据(Chl-*a*)转换为0.25°×0.25°的空间分辨率, 使用MATLAB2020(a)软件将0.25°×0.25°的渔业数据与环境数据进行时空匹配。

1.2 数据分析方法

1.2.1 单位捕捞努力渔获量 按照经纬度0.25°×0.25°的空间分辨率计算2019—2020年远东拟沙丁鱼渔场的单位捕捞努力渔获量(catch per unit effort, CPUE)的月平均值, 计算公式为(田思泉等, 2010):

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

式中, C 为0.25°×0.25°网格内2019—2020年4—11月每月的渔获量(t), E 为0.25°×0.25°网格内每月作业的总网次数(网), CPUE单位为t/网。共获得CPUE样本数量766个。

1.2.2 渔场重心计算 渔场时空位置的变化可以使用渔场重心来描述, 其计算公式为(唐峰华等, 2014; 化成君等, 2014):

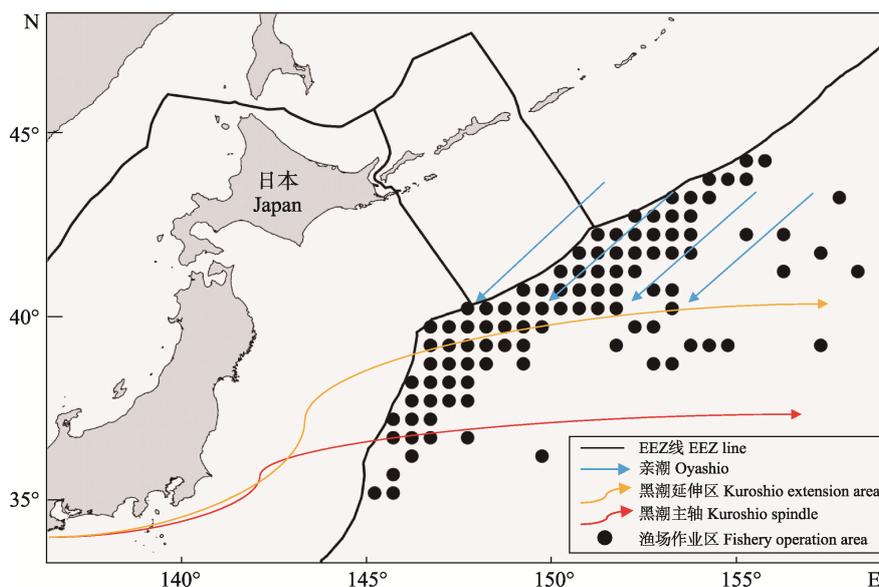


图1 北太平洋远东拟沙丁鱼作业范围

Fig.1 Range of *Sardinops sagax* operation in the North Pacific

$$X = \frac{\sum_i^n C_i \times X_i}{\sum_i^n C_i}; Y = \frac{\sum_i^n C_i \times Y_i}{\sum_i^n C_i} \quad (2)$$

式中, X 代表渔场重心的经度, Y 代表渔场重心的纬度; X_i 为第 i 网次放网时的纬度, Y_i 代表第 i 网次放网时的纬度; C_i 为第 i 网次的 CPUE, n 代表下网的总次数。使用 ArcGIS 10.6 软件绘制渔场重心分布图。

1.2.3 渔场与适宜环境区间 SST、Chl- a 、SSH 与 CPUE 的时空变化规律使用 ArcGIS 10.6 软件绘制分布图来分析, 其最适环境参数通过频次分析与经验累积分布函数(ECDF)得到。高值 CPUE 与适宜表层环境参数区间和表层环境参数的平均值, 采用非参数统计 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 检验方法进行显著性检验。检验方法为分别计算 3 个表层环境变量和中心渔场(CPUE>10 t/网的海域) CPUE 累计频度曲线, 求出 K-S 检验的统计量 D , 并与 $D_{0.05}=0.07$ (据样本数 766, 选取显著性水平为 0.05 可得) 相比较, 观察其是否具有显著相关性。累计分布曲线方程和统计量计算公式如下所示(Perry *et al.*, 1994):

$$f(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l(x_i) \quad (3)$$

其中, 分段函数 $l(x_i)$ 表达式为:

$$l(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i < t \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$g(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{\bar{y}} l(x_i) \quad (5)$$

$$D = \max |g(t) - f(t)| \quad (6)$$

式中, $f(t)$ 是特征参数经验累积频率分布函数, $l(x_i)$ 是分段函数, $g(t)$ 是中心渔场 CPUE 权重经验累积分布函数。 n 为资料个数; t 为分组环境因子值, x_i 为第 i 月温跃层特征参数值; y_i 为第 i 月的月平均 CPUE; \bar{y} 为月平均 CPUE 的平均值; D 为 K-S 检验中的临界值; 通过给定的显著水平 α , 采用 K-S 检验统计量。统计分析使用 MATLAB 2020(a) 软件及相关工具包。

1.2.4 GAM 模型构建 使用广义可加模型 (generalized additive model, GAM) 对远东拟沙丁鱼及其影响因子的关系进行分析, 将标准化后的沙丁鱼 CPUE 作为响应变量, SST、SSH、Chl- a 浓度、Lon、Lat 和 month 作为解释变量构建 GAM 模型, 分析时空和环境因子对 2019—2020 年远东拟沙丁鱼 CPUE 的时空分布的影响。GAM 的表达式为:

$$\log(\text{CPUE}) + 1 \sim S(\text{SST}) + S(\text{SSH}) + S(\text{Lon}) + S(\text{Lat}) + S(\text{Chl-}a) + S(\text{month}) + \varepsilon \quad (7)$$

S 为自然立方样条平滑 (natural cube spline

smoother), ε 为误差项。在处理 GAM 模型时, 为避免因为 CPUE 出现零值报错, 将所有处理过的标准 CPUE 加 1 后再处理。将 GAM 模型的模拟结果中上下 95% 置信区间虚线离实线最接近的区间定义为渔场最适环境因子的范围, F 检验来评估影响因子的显著性。GAM 模型采用 R 语言及相关工具包实现。

2 结果

2.1 渔获量

2019 年, 远东拟沙丁鱼总产量为 23 751.6 t, 5—9 月每月产量均保持在 3 000 t 左右的较高水平, 5 月总产量达到峰值, 为 3 877.8 t (图 2)。2020 年, 远东拟沙丁鱼总产量达到 87 384.47 t, 较 2019 年增幅为 268%, 7—8 月产量维持在较高水平 (约 20 000 t), 7 月产量达到峰值, 为 20 074.45 t。2019 年 CPUE 值波动较小, 6 月 CPUE 值最高 (11.25 t/网)。2020 年 CPUE 值在生产初期波动较大, 在生产中期直至末期趋于稳定, 5 月 CPUE 值最高 (24.61 t/网) (图 2)。

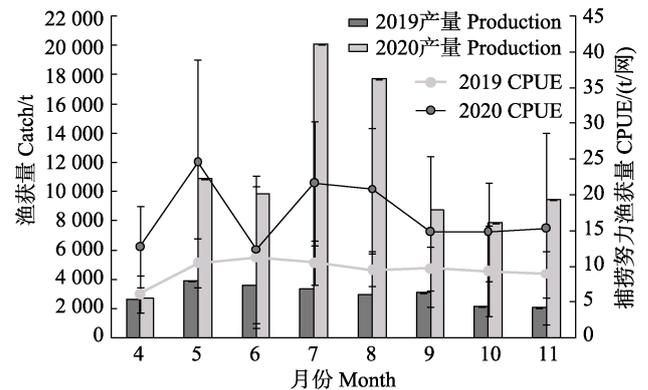


图 2 2019—2020 年北太平洋远东拟沙丁鱼月平均产量和 CPUE (平均值±标准误)

Fig.2 Average monthly *S. sagax* production and CPUE in the North Pacific in 2019–2020 (Mean±SE)

2.2 渔场重心变化

在春季 (4—5 月) 和夏季 (6—8 月), 2019 年远东拟沙丁鱼渔场重心空间变化规律与 2020 年基本一致, 均从 147~148°E、39~40°N 海域开始作业, 随后向东北方向移动至东北端海域 (152~153°E、42~43°N)。在秋季 (9—11 月), 2020 年渔场重心仅向西南方向折返至 152°E、42°N, 149°E、41°N, 比 2019 年更偏北 (图 3)。

2.3 远东拟沙丁鱼渔场与海洋环境的关系

2.3.1 远东拟沙丁鱼渔场与海表温度的关系 北太平洋远东拟沙丁鱼渔场分布呈现明显的时空差异 (图 4)。

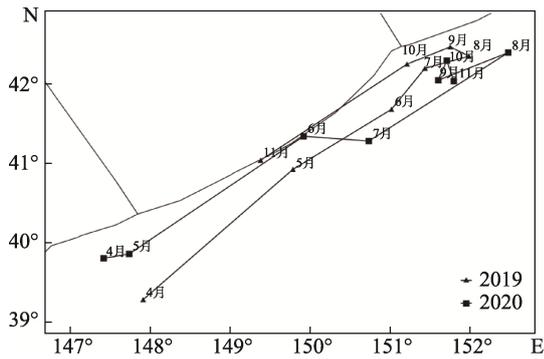


图3 2019—2020年北太平洋远东拟沙丁鱼渔场重心月变化
Fig.3 Monthly changes of *S. sagax* fishing ground center in the North Pacific in 2019–2020

空间上, 中心渔场区域随着季节变化逐渐向北转移。时间上, 不同月份中心渔场对应的适宜海表温度范围有所不同; 6月渔场区最适 SST 范围为 14.0~16.0 °C, 7—9月为 18.0~20.0 °C, 11月为 11.0~13.0 °C。此外, 高值 CPUE 多出现在等值线较为密集的海域。

由散点图(图 5a)得出, 远东拟沙丁鱼渔场的 SST 适宜温度范围为 11~20 °C, 作业网次数比例较高值(9%~11%)渔场适宜 SST 范围为 10.9~17.9 °C(图 5b), 综合 SST 空间叠加图(图 4)与 SST 散点与频次分析图(图 5)的分析结果得出, CPUE 高值区所在的适宜温度范围为 10.0~18.0 °C。

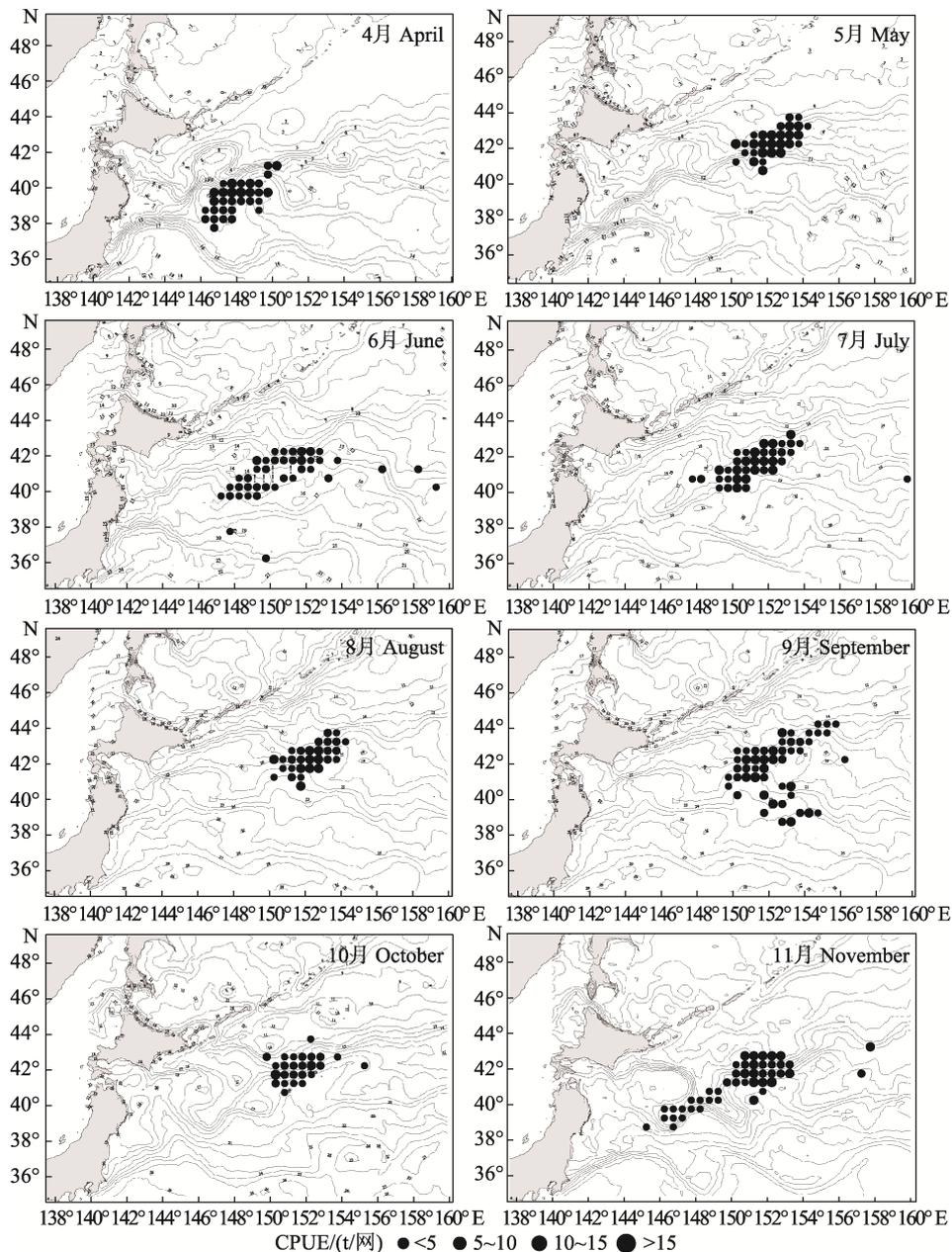


图4 2019—2020年北太平洋远东拟沙丁鱼月平均 CPUE 和海表温度空间叠加
Fig.4 Stack distribution of SST and CPUE of *S. sagax* in the North Pacific in 2019–2020

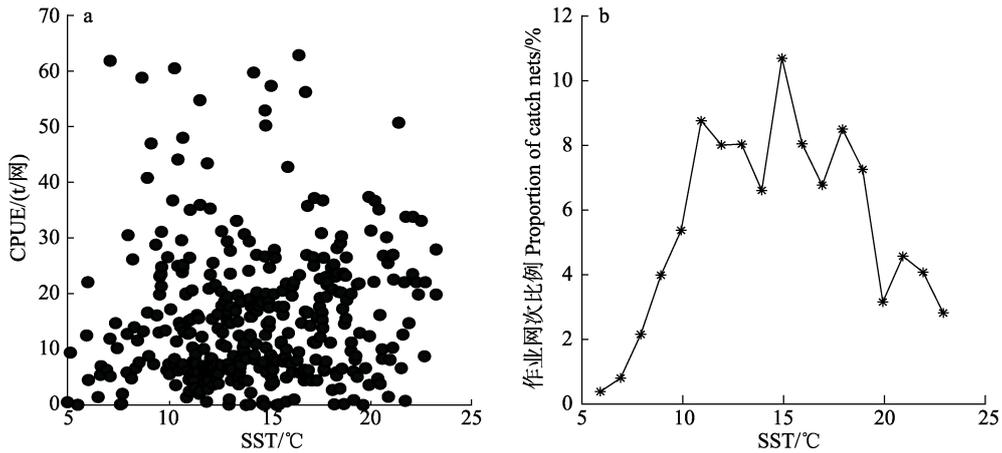


图 5 2019—2020 年北太平洋远东拟沙丁鱼 CPUE 与海面温度散点图(a)及作业网次比例与海面温度频次图(b)
Fig.5 Scatter plot between *S. sagax* CPUE and SST (a), and frequency plot of proportion of catch nets and SST (b) in the North Pacific in 2019–2020

2.3.2 远东拟沙丁鱼渔场与叶绿素的关系 北太平洋远东拟沙丁鱼渔场与 Chl-*a* 同样呈现较为明显的时间与空间差异, 通过 Chl-*a* 环境因子与 CPUE 叠加可以得出(图 6), 随着季节的变化, Chl-*a* 浓度在空间上也发生变化, 具体表现在 4—6 月高值区(0.8~1.2 mg/m³)空间分布较广, 6 月之后逐渐向西北方向收缩, 10—11 月公海海域的浓度较低。虽然浓度在时空尺度上变化较大, 但从整个作业期间来看, 远东拟沙丁鱼的大部分高值 CPUE 区的最适叶绿素浓度为 0.3~0.5 mg/m³(图 6)。

由散点图(图 7a)得出, 远东拟沙丁鱼中心渔场适宜的 Chl-*a* 浓度范围为 0.2~0.5 mg/m³, 作业网次数比例较高值(15%~26%)的渔场适宜 Chl-*a* 范围为 0.2~0.6 mg/m³(图 8b), 综合 Chl-*a* 空间叠加图(图 6)和散点与频次分析图(图 7)可知, CPUE 高值海域的适宜浓度为 0.2~0.6 mg/m³。

2.3.3 远东拟沙丁鱼渔场与海面高度的关系 北太平洋远东拟沙丁鱼渔场生产期间海面高度南部整体大于北部(图 8), 南部 36°N 附近为黑潮延伸区, 海面高度较高。通过分析叠加图得出, 渔汛期 CPUE 高值区海面高度为 0.3~0.7 m。此外, 在 9—11 月, 高值 CPUE 区所对应的海域为海面高度等值线密集区。

由散点图(图 9a)得出, 远东拟沙丁鱼中心渔场适宜 SSH 范围为 0.2~0.7 m, 作业网次数比例较高值(12%~19%)的渔场适宜 SSH 为 0.2~0.5 m(图 10b), 综合 SSH 空间叠加图(图 8)与散点与频次分析图(图 9)的结果得出, CPUE 的高值区所在海域的适宜范围为 0.2~0.7 m。

2.3.4 K-S 检验分析 在 $\alpha=0.05$ 显著性的水平下, SST、Chl-*a* 和 SSH 3 个参数对应的 *D* 值分别为 0.03、

0.01 和 0.03, 均小于 $D_{0.05}=0.07$, 表明 CPUE 和 3 个参数变量服从了同一分布, 说明高值 CPUE 海域与 Chl-*a*、SSH、SST 均有密切关系, 最适范围分别为 0.2~0.6 mg/m³、0.2~0.7 m 和 10.9~18.9 °C(图 11)。

2.3.5 GAM 模型分析 GAM 模型分析环境因子和时空因素对 2019—2020 年北太平洋公海远东拟沙丁鱼 CPUE 的结果见图 11。高值 CPUE 的最适 SST 为 11~17 °C, 最适 Chl-*a* 为 0.3~0.8 mg/m³, 最适 SSH 为 0.1~0.4 m, 远东拟沙丁鱼的作业渔场主要集中在 149°~153°E、40°N~42°N。GAM 结果表明, 5—7 月的 CPUE 值较高, 8—10 月呈负相关, CPUE 值较低, 10 月之后呈正相关, CPUE 值提升。根据远东拟沙丁鱼的 CPUE 与环境因子与时空因子的 GAM 模型, 经 *F* 检验得到(表 1), SST、SSH、Chl-*a*、Lat 差异性极显著($P<0.001$), month、Lon 差异显著($P<0.05$)。

表 1 2019—2020 年北太平洋远东拟沙丁鱼环境因子与渔获量 GAM 模拟的检验系数值和显著性

Tab.1 Test coefficient values and significance of GAM simulations of environmental factors and *S. sagax* fishery in the North Pacific in 2019–2020

环境因子 Environment factor	有效自由度 Effective degrees of freedom	<i>F</i>	<i>P</i>
海表温度 SST	8.673	8.969	$<2\times 10^{-16}$ ***
海面高度 SSH	5.501	3.870	4.910×10^{-4} ***
叶绿素 <i>a</i> Chl- <i>a</i>	8.239	28.680	$<2\times 10^{-16}$ ***
月份 month	4.897	3.108	7.478×10^{-3} **
经度 Lon	9.017	2.407	6.285×10^{-3} **
纬度 Lat	8.396	6.812	$<2\times 10^{-16}$ ***

注:**代表 1%显著性水平, ***代表 0.1%显著性水平。

Note: ** represents 1% significance level, and *** represents 0.1% significance level.

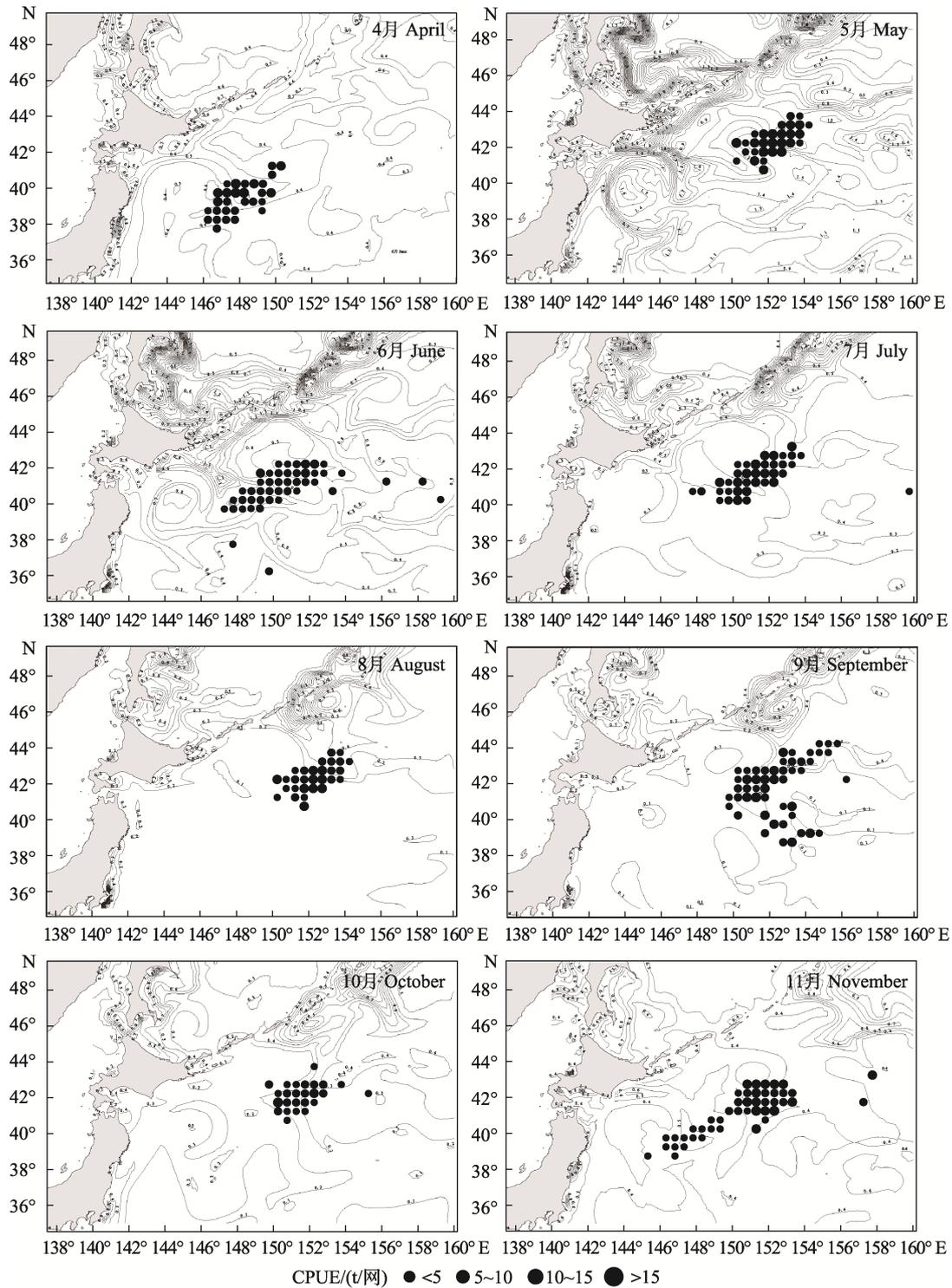


图6 2019—2020年北太平洋远东拟沙丁鱼月平均CPUE和叶绿素浓度空间叠加
Fig.6 Stack distribution of Chl-a and CPUE of *S. sagax* in the North Pacific in 2019–2020

根据 GAM 模型分析环境因子对中心渔场的结果来看,对其影响最大的为 SST 与 Chl-a 浓度,SSH 对其影响不如前二者。空间上来看,纬度对中心渔场分布的影响大于经度,时间尺度上来看,5—7月 CPUE 值较高,8—10月 CPUE 值较低。

3 讨论

3.1 产量、CPUE 及渔场重心的变化

2019年 CPUE 从生产作业初期(4月)至末期(10、11月)波动不大,维持在 10 t/d 左右。2020年在生产

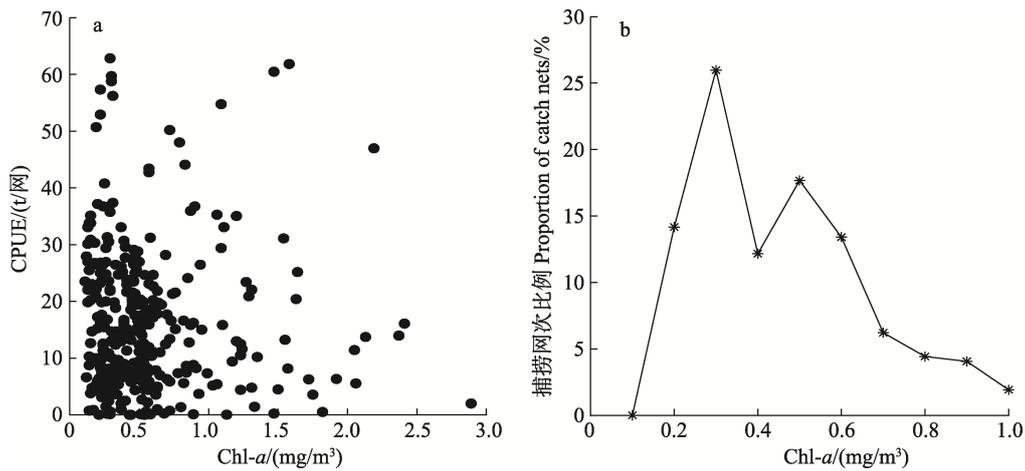


图7 2019—2020年北太平洋远东拟沙丁鱼 CPUE 与叶绿素浓度(a)及作业网次比例与叶绿素浓度(b)的关系

Fig.7 Relationship between *S. sagax* CPUE and Chl-*a* (a), proportion of catch nets and Chl-*a* (b) in the North Pacific in 2019–2020

a: 散点图; b: 频次图

a: Scatter plot; b: Frequency plot

作业初期和中期 CPUE 波动较大, 初期(5月)较高(24.61 t/d), 中期(7—8月)维持在 20 t/d 左右, 末期(9—11月)维持在 15 t/d 左右, CPUE 值的变化可以很好地体现沙丁鱼渔业的资源变动, 在外界环境没有显著变化的情况下, 2020年 CPUE 值的升高与北太平洋远东拟沙丁鱼资源量变好有直接关联。渔场重心的变化在生产作业初期, 远东拟沙丁鱼渔场重心位于 147.9°E、39.2°N 附近海域, 之后向东北方向移动, 生产作业中期到达最东北端(151.9°E、42.3°N), 生产作业末期再向西南海域(149.4°E、41.1°N)折返, 其空间变化与远东拟沙丁鱼的迁徙变化一致(Okunishi *et al.*, 2009), 与 2016—2017 年北太平洋公海围网主要渔获种类渔场重心与环境因子的分析结果同样相符(徐博等, 2020)。

3.2 远东拟沙丁鱼渔场与海洋环境的关系

远东拟沙丁鱼和日本鲭同属中上层鱼类, 且生活习性类似, 因此, 可采用日本鲭的中心渔场与海洋环境因子的关系来对比远东拟沙丁鱼(戴澍蔚等, 2018)。研究表明, SST、SSH、Chl-*a* 这些海洋环境因子对日本鲭中心渔场的有显著影响(袁小楠等, 2016)。本文综合频次分析、ECDF 方法、K-S 检验分析与广义可加模型 GAM 等 4 种方法得出, 北太平洋远东拟沙丁鱼渔场的适宜海洋环境因子分布范围, SST 为 11~18 °C, Chl-*a* 为 0.2~0.6 mg/m³, SSH 为 0.2~0.7 m。

各个海洋环境因子之间均有着密切关系(刘金立等, 2021), 并且对远东拟沙丁鱼的洄游、生殖和产卵都有着非常重要的影响, 北太平洋的海表温度有着随着季节变化呈先升高再降低的趋势, 中心渔场随上述

规律先向东北方向移动, 到生产作业末期再向西南折返, 以寻求 11~18 °C 范围的最适海表温度环境。北太平洋的海表温度除了受季节影响之外, 同时受黑潮的影响也较大, 从北赤道流北上的黑潮携带着高温、高盐的海流影响着北太平洋的渔场(Watanabe *et al.*, 1995), 在黑潮延伸区远东拟沙丁鱼的自然死亡系数与春、冬季海表温度呈显著正相关(Noto *et al.*, 1999)。对于沙丁鱼幼鱼, 其洄游路线上的海温和食物密度被认为是影响生存和决定资源丰度的主要因素(Kawasaki *et al.*, 2010), 海洋中叶绿素浓度是浮游植物存量多少的一个重要指标, 其分布反映了海水中浮游植物及藻类的丰度及其相关的变化规律(刘广鹏, 2014), 远东拟沙丁鱼的主要摄食对象为海洋中的藻类和浮游植物, 其资源量的变化与因气候变动而导致的藻类和浮游植物的变化趋势非常吻合(Kawasaki *et al.*, 1984)。北太平洋远东拟沙丁鱼的最适叶绿素浓度为 0.3~0.6 mg/m³, 当叶绿素浓度不适宜时, 渔获量都较少; 在相关海域海洋环境中叶绿素浓度适宜时(7—8月), 渔场产量较高; 在相关海域的海洋环境中叶绿素浓度较高时(4—6月、10—11月), 产量较叶绿素浓度适宜时(7—8月)低, 说明远东拟沙丁鱼对叶绿素浓度的季节性变化反应较为显著。海流的聚合和辐散会影响海面高度的上升和下降, 从而形成渔场区域(邵全琴等, 2005; Wang *et al.*, 2021)。北太平洋的黑潮延伸区有明显的 SSH 梯度密集的海域(Bo *et al.*, 2000), 密集梯度的出现与黑潮和亲潮的交汇相关(Imawaki *et al.*, 2001), 中心渔场大多分布在密集梯度区偏北一侧, 与黑潮延伸体的北面分支海域相重叠(图 1), 黑潮的延伸带来了大量的营养物质和 CO₂ 复杂水团(Sakamoto *et al.*, 2005;

Nakano *et al*, 2011), 由此所形成的特殊海洋环境使得该海域不仅形成了远东拟沙丁鱼的渔场, 同时也是柔鱼、日本鲭等诸多渔业的复合渔场(陈新军等, 2012、1997; 解明阳等, 2021)。

北太平洋远东拟沙丁鱼中心渔场的分布除了与上述的海洋环境因子相关外, 在远东拟沙丁鱼研究中的气候变化对资源量变动是一个非常重要的因素, 其变化会直接影响海洋环境因子的变动(Alheit *et al*,

2012; Kaplan *et al*, 2016), 进而导致远东拟沙丁鱼的栖息地随之变化(Urias-Sotomayor *et al*, 2018)。目前, 国内关于北太平洋公海远东拟沙丁鱼的研究较少, 但根据其捕捞数据及 CPUE 值来看, 在作业方式与渔船数量基本保持不变的情况下, 2020 年 CPUE 值大幅提升。导致该现象的相关因素有很多, 仍需要采集更多的远东拟沙丁鱼渔业数据, 更加了解其生物学特征和洄游习性, 才能得出针对该现象的相关结论。

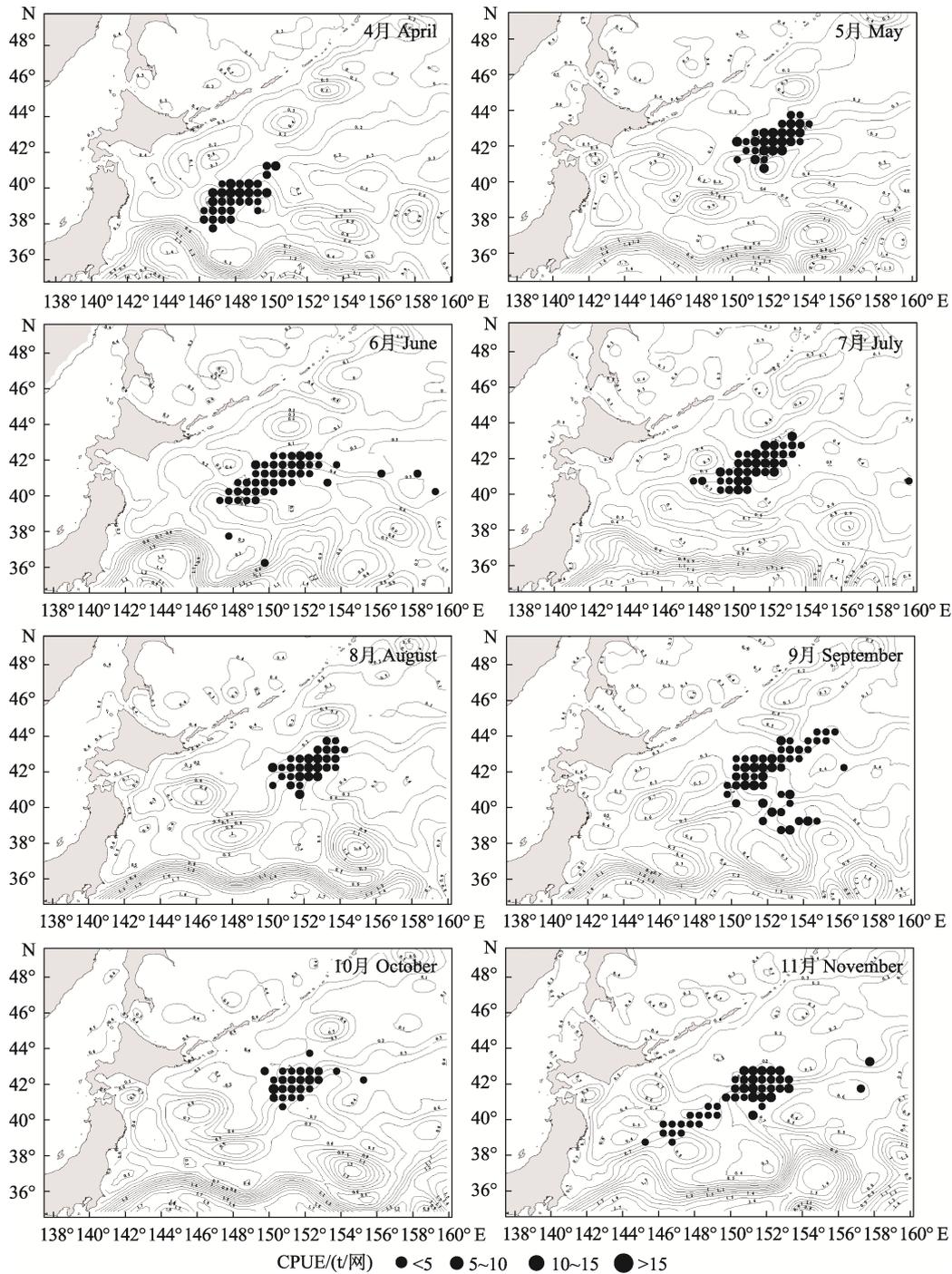


图 8 2019—2020 年北太平洋远东拟沙丁鱼月平均 CPUE 和海面高度空间叠加
Fig.8 Stack distribution of SSH and CPUE of *S. sagax* in the North Pacific in 2019–2020

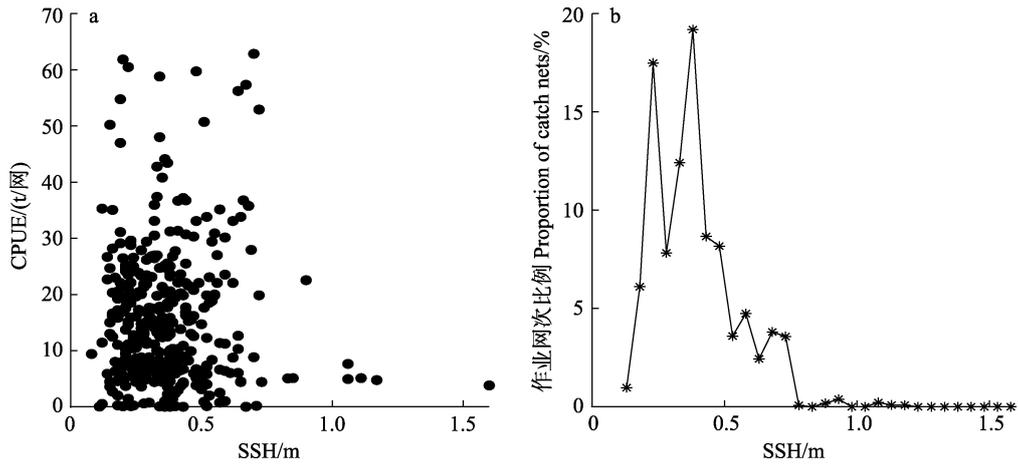


图 9 2019—2020 年北太平洋远东拟沙丁鱼 CPUE 与海面高度(a)及作业网次比例与海面高度(b)的关系
 Fig.9 Relationship between *S. sagax* CPUE and SSH (a), proportion of catch nets and SSH (b) in the North Pacific in 2019–2020

a: 散点图; b: 频次图
 a: Scatter plot; b: Frequency plot

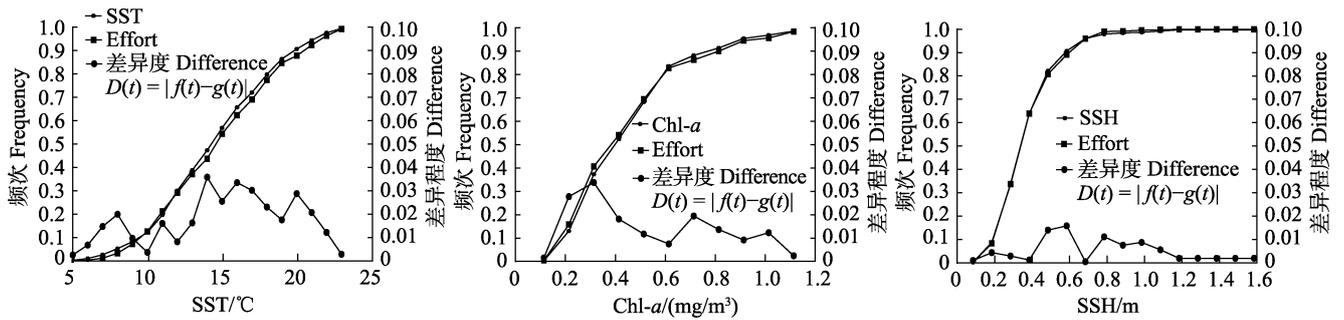


图 10 2019—2020 年北太平洋远东拟沙丁鱼 CPUE 与 SST、Chl-a、SSH 的关系
 Fig.10 Relationship between the *S. sagax* CPUE and SST, Chl-a and SSH in the North Pacific in 2019–2020

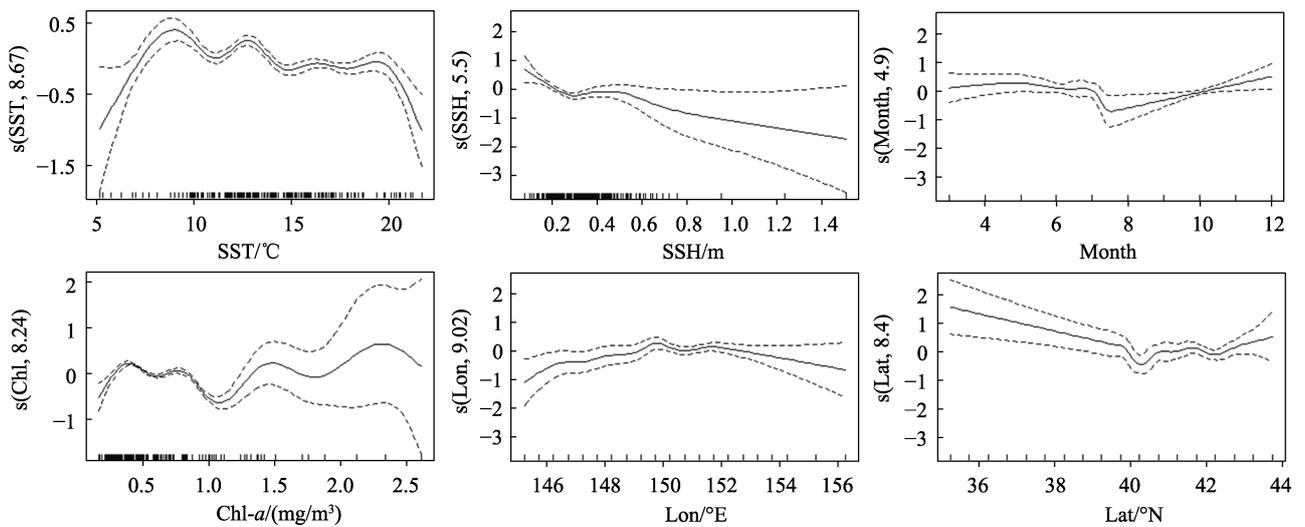


图 11 2019—2020 年北太平洋远东拟沙丁鱼环境因子与渔获量 GAM 模拟结果
 Fig.11 GAM simulation results of environmental factors and catch of *S. sagax* in the North Pacific in 2019–2020

参 考 文 献

- ALHEIT J, POHLMANN T, CASINI M, *et al.* Climate variability drives anchovies and sardines into the North and Baltic Seas. *Progress in Oceanography*, 2012, 96(1): 128–139
- BO Q. Interannual variability of the Kuroshio extension system and its impact on the wintertime SST field. *Journal of Physical Oceanography*, 2000, 30(6): 1486–1502
- CHEN X J, LU H J, LIU B L, *et al.* Current exploitation and some scientific issues in the sustainable utilization of Ommastrephidae. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2012, 21(5): 831–840 [陈新军, 陆化杰, 刘必林, 等. 大洋性柔鱼类资源开发现状及可持续利用的科学问题. *上海海洋大学学报*, 2012, 21(5): 831–840]
- CHEN X J. An Analysis on marine environmental factors of fishing ground of *Ommastrephes bartrami* in northwestern Pacific. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 1997, 6(4): 263–267 [陈新军. 关于西北太平洋的柔鱼渔场形成的海洋环境因子的分析. *上海水产大学学报*, 1997, 6(4): 263–267]
- DAI S W. Basic biological property and spatiotemporal dynamics in fishing ground of scomber japonicas in North Pacific high seas. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2018 [戴澍蔚. 北太平洋公海日本鲭基础生物学特征及其渔场时空动态. *上海海洋大学硕士研究生学位论文*, 2018]
- GUAN X D. *Sardinops sagax* from the coast of Japan. *Marine Fisheries*, 1985(4): 187–189 [管锡弟. 日本周围沿海的远东拟沙丁鱼. *海洋渔业*, 1985(4): 187–189]
- HU Y Z, QIAN S Q. A study on the age and growth of *Sardinops melanotictus* (Temminck et Schlegel) in off-sea waters of the East China Sea. *Fishery Information and Strategy*, 1993(7): 16–19 [胡雅竹, 钱世勤. 东海外海远东拟沙丁鱼的年龄和生长的研究. *现代渔业信息*, 1993(7): 16–19]
- HUA C J, ZHANG H, WU Y M, *et al.* Spatiotemporal patterns of fishing grounds of tuna longline fishery in the mid-eastern Pacific Ocean. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(5): 1243–1247 [化成君, 张衡, 伍玉梅, 等. 中东太平洋金枪鱼延绳钓中心渔场的时空变化. *生态学杂志*, 2014, 33(5): 1243–1247]
- IMAWAKI S, UCHIDA H, ICHIKAWA H, *et al.* Satellite altimeter monitoring the Kuroshio transport south of Japan. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(1): 17–20
- KAPLAN I C, WILLIAMS G D, BOND N A, *et al.* Cloudy with a chance of sardines: Forecasting sardine distributions using regional climate models. *Fisheries Oceanography*, 2016, 25(1): 15–27
- KAWASAKI T, KUMAGAI A. Food habits of the far eastern sardine and their implication in the fluctuation pattern of the sardine stocks. *Nihon-Suisan-Gakkai-Shi*, 1984, 50(10): 1657–1663
- KAWASAKI T. Recovery and collapse of the Far Eastern sardine. *Fisheries Oceanography*, 2010, 2(3/4): 244–253
- LI R, ZHANG H L, LI X Y, *et al.* Umami substances comparison of *Sardinops sagax* fish sauces prepared by three fermentation processes. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(22): 143–149 [李锐, 张海玲, 李旭艳, 等. 三种发酵方法制备远东拟沙丁鱼鱼露中鲜味物质的比较. *食品与发酵工业*, 2019, 45(22): 143–149]
- LI Y H, LI J H, JI H W, *et al.* Isolation, purification and structural analysis of antioxidant peptides from *Sardinops sagax*. *Chinese Journal of Food*, 2021, 21(2): 229–238 [李亚会, 李积华, 吉宏武, 等. 远东拟沙丁鱼抗氧化肽的分离纯化及结构解析. *中国食品学报*, 2021, 21(2): 229–238]
- LIU G P. Spatial and temporal variability of chlorophyll-*a* patterns and its mechanisms off the Yangtze River estuary. Master's Thesis of East China Normal University, 2014 [刘广鹏. 长江口及邻近海域叶绿素时空变化及影响机制. *华东师范大学硕士研究生学位论文*, 2014]
- LIU J L, CHEN X J. Research progress and hotspots of marine biodiversity: Based on bibliometrics and knowledge mapping analysis. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, 42(1): 201–213 [刘立金, 陈新军. 海洋生物多样性研究进展及其热点分析. *渔业科学进展*, 2021, 42(1): 201–213]
- MA C, ZHUANG Z D, LIU Y, *et al.* Preliminary study on catch composition and biological characteristics of light-liftnet in the Northwest Pacific Ocean. *Journal of Fisheries Research*, 40(2): 141–147 [马超, 庄之栋, 刘勇, 等. 西北太平洋公海灯光敷网渔获组成及主要种类渔业生物学特性研究. *渔业研究*, 2018, 40(2): 141–147]
- NAKANO H, TSUJINO H, HIRABARA M, *et al.* Uptake mechanism of anthropogenic CO₂ in the Kuroshio extension region in an ocean general circulation model. *Journal of Oceanography*, 2011, 67(6): 765–783
- NIPPON SUISAN GAKKAISHI. 北太平洋漁業委員会(NPFC)について, 2016, 82
- NOTO I M. Population decline of the Japanese sardine, *Sardinops melanostictus*, in relation to sea surface temperature in the Kuroshio extension. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, 56(6): 973–983
- OKUNISHI T, YAMANAKA Y, ITO S I. A simulation model for Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) migrations in the western North Pacific. *Ecological Modelling*, 2009, 220(4): 462–479
- PERRY R I, SMITH S J. Identifying habitat associations of marine fishes using survey data: An application to the Northwest Atlantic. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1994, 51(3): 589–602
- SAKAMOTO T T, HASUMI H, ISHII M, *et al.* Responses of the

- Kuroshio and the Kuroshio extension to global warming in a high-resolution climate model. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(14): 337–349
- SHAO Q Q, MA W W, CHEN Z Q, *et al.* Relationship between Kuroshio meander pattern and *Ommastrephes bartrami* CPUE in Northwest Pacific Ocean. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(2): 111–122 [邵全琴, 马巍巍, 陈卓奇, 等. 西北太平洋黑潮路径变化与柔鱼 CPUE 的关系研究. *海洋与湖沼*, 2005, 36(2): 111–122]
- TANG F H, CUI X S, YANG S L, *et al.* GIS analysis on effect of temporal and spatial patterns of marine environment on purse seine fishery in the western and central Pacific. *South China Fisheries Science*, 2014, 10(2): 18–26 [唐峰华, 崔雪森, 杨胜龙, 等. 海洋环境对中西太平洋金枪鱼围网渔场影响的 GIS 时空分析. *南方水产科学*, 2014, 10(2): 18–26]
- TIAN S Q, CHEN X J, *et al.* Impacts of different calculating methods for nominal CPUE on CPUE standardization. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, 19(2): 240–245 [田思泉, 陈新军. 不同名义 CPUE 算法对 CPUE 标准化的影响. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(2): 240–245]
- URIAS-SOTOMAYOR R, RIVERA-PARRA G I, MARTINEZ-CORDERO F J, *et al.* Stock assessment of jumbo squid *Dosidicus gigas* in northwest Mexico. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 2018, 46(2): 330–336
- WANG M Y, DONG W D. Development and utilization of the *Sardinops sagax* in the Far East. *Fisheries Science*, 1992(7): 14–16 [王明彦, 董文德. 远东拟沙丁鱼的开发利用现状. *水产科学*, 1992(7): 14–16]
- WANG Y T, TANG R, YU Y, *et al.* Variability in the sea surface temperature gradient and its impacts on oceanic features in the Kuroshio extension. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 888
- WATANABE Y, ZENITANI H, KIMURA R. Population decline of the Japanese sardine *Sardinops melanostictus* owing to recruitment failures. *Journal Canadien Des Sciences Halieutiques et Aquatiques*, 1995, 52(8): 973–983
- WEI S, CHEN Y Z, ZHOU B B, *et al.* Identification of sardine *Sardinops melanostictus* (*temmincket schrdinops*) populations in Yellow Sea. *Marine Science*, 1989(4): 55–60 [韦晟, 陈毓桢, 周彬彬, 等. 黄海远东拟沙丁鱼种群鉴别的研究. *海洋科学*, 1989(4): 55–60]
- XIE M Y, CHEN X J. Analysis of the fishing seasons characteristics of *Ommastrephes bartramii* and prediction of the main fishing seasons based on the grey system theory. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, 42(4): 1–8 [解明阳, 陈新军. 基于灰色系统的北太平洋柔鱼渔汛特征分析及旺汛预测. *渔业科学进展*, 2021, 42(4): 1–8]
- XU B, ZHANG H, TANG F H, *et al.* Relationship between center of gravity and environmental factors of main catches of purse seine fisheries in North Pacific high seas based on GAM. *South China Fisheries Science*, 2020, 16(5): 60–70 [徐博, 张衡, 唐峰华, 等. 基于 GAM 的北太平洋公海围网主要渔获种类渔场重心与环境因子的关系分析. *南方水产科学*, 2020, 16(5): 60–70]
- YUAN X N, CHEN X J, LI G, *et al.* Annual change of fishing ground gravity for *Scomber japonicas* by large light seine fishery and their relationship with environmental factors in the East China Sea and Yellow Sea. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2016, 36(3): 110–114 [袁小楠, 陈新军, 李纲. 东黄海日本鲷灯光围网渔场重心年际变化及其与环境因子关系. *广东海洋大学学报*, 2016, 36(3): 110–114]

(编辑 冯小花)

Spatio-Temporal Distribution of *Sardinops sagax* in the North Pacific: Optimal Environmental Characteristics

YANG Chao^{1,2}, ZHANG Heng^{1,2,3①}, HAN Haibin^{1,2}, ZHAO Guoqing^{1,2},
SHI Yongchuang^{1,2}, XU Bo⁴, JIANG Peiwen^{2,5}, YAN Yunzhi⁵, GE Yali⁵

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

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. Yangtze Delta Estuarine Wetland Ecosystem Observation and Research Station, Ministry of Education & Shanghai Science and Technology Committee, Shanghai 202162, China; 4. Polar Research Institute of China, Shanghai 201209, China;

5. School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

Abstract Sea surface temperature (SST) and chlorophyll concentration in the North Pacific in 2019–2020 were analyzed based on the data of light net fertilization fisheries, including chlorophyll-*a*, sea surface height (SSH), and data regarding other environmental factors. The spatial and temporal distribution characteristics of catch per unit effort (CPUE) and its relationship with key environmental factors of *Sardinops sagax* fishery in the Far East were analyzed by spatial superposition map and frequency analysis, empirical cumulative distribution function, K-S test, and GAM model. The results showed that the geographical fishery center ranges from 147°–153°E and 39°–43°N and moves to the northeast from April to August, returning to the southwest from September to November. According to the frequency analysis and empirical cumulative distribution function, the optimal SST and chlorophyll concentration in the central fishing area were 10.0–18.0 °C and 0.2–0.6 mg/m³, while the optimal sea level was 0.2–0.7 m. The K-S test showed that high CPUE was closely related to SST, chlorophyll concentration, and sea surface height, and the optimal ranges were 10.9–18.9 °C, 0.2–0.6 mg/m³, and 0.2–0.7 m, respectively. The GAM model simulation results showed that the optimal SST of high CPUE was 11.0–17.0 °C, the optimal chlorophyll concentration was 0.3–0.8 mg/m³, and the optimal sea surface height was 0.1–0.4 m. Overall, the results showed that the optimal SST, chlorophyll concentration, and sea surface height were 11.0–18.0 °C, 0.2–0.6 mg/m³, and 0.2–0.7 m, respectively.

Key words North Pacific high seas; *Sardinops sagax*; Environmental factors; GAM

① Corresponding author: ZHANG Heng, E-mail: zhangziqian0601@163.com