

文章编号: 1000-0615(2018)12-1916-11

DOI: 10.11964/jfc.20180211189

## 西北太平洋公海秋刀鱼渔场分布与海表温度锋的相关关系

刘瑜<sup>1</sup>, 郑全安<sup>2</sup>, 李晓峰<sup>1\*</sup>

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 马里兰州大学大气与海洋科学系, 美国 马里兰州 20742)

**摘要:** 西北太平洋公海秋刀鱼渔业是我国重要的经济渔业之一, 其渔场分布与海表温度及温度变化息息相关。本研究通过海表温度(SST)的遥感数据计算海表水平温度梯度(SSTG), 根据2013—2015年中国(不含中国台湾省)北太平洋公海秋刀鱼渔业生产数据, 分析海表温度锋与秋刀鱼资源丰度和渔场时空分布的关系。结果显示, 秋刀鱼作业渔场主要分布于37°~49°N, 145°~165°E; SST为10~14 °C时, 单位捕捞渔获量(CPUE)与SST呈负相关, SST为14~17 °C时呈正相关, 最适宜SST为12.5~14.5 °C。当SSTG为0.01~0.06 °C/km时, CPUE与SSTG呈显著线性正相关, 最适宜SSTG为0.01~0.05 °C/km。作业海域温度锋与CPUE呈显著正相关, 相关系数为0.81; CPUE作业点到锋面的距离(DIST)表现出明显的季节特征, 在夏季6—8月, 当DIST为0~100 km范围内时, CPUE与DIST呈线性正相关, 在秋季9—11月, CPUE与DIST呈对数负相关, 90%以上的作业点出现在DIST为0~50 km范围内。研究表明, 海表温度影响着秋刀鱼洄游渔场分布, 亲潮黑潮交汇区形成冷水楔, 海表温度锋集聚, 进而秋刀鱼鱼群集群, 形成高产渔场。

**关键词:** 秋刀鱼; 海表温度梯度; 温度锋; 西北太平洋

**中图分类号:** S 931.41

**文献标志码:** A

秋刀鱼(*Cololabis saira*)为冷水洄游性中上层鱼类, 为西北太平洋公海重要的经济鱼类之一, 主要生产国家包括中国、日本、俄罗斯、韩国等。作为短生命周期鱼类, 秋刀鱼对温度极为敏感<sup>[1]</sup>, 水温在其资源丰度和分布上起着关键性的作用。海洋环境因子, 如叶绿素、涡动能和海面高度等也在一定程度上影响着秋刀鱼的时空分布, 一些学者利用这些因子开展秋刀鱼渔业的渔情预报<sup>[2-3]</sup>。

秋刀鱼渔场主要分布于黑潮及亲潮的交汇海域(37°~49°N, 145°~165°E), 该区域冷暖水团交汇形成海洋温度锋。海洋温度锋区所在的海域海水辐聚/辐散, 垂直运动加强, 营养盐富集并伴有浮游植物大量繁殖, 从而成为高生产力区, 吸引浮游动物和鱼类来此索饵与繁衍, 使得锋区通常形成良好的渔场<sup>[4-5]</sup>。例如中国的舟山渔场和日本的北海道渔场等。范秀梅等<sup>[6]</sup>进行

了北太平洋叶绿素和海表温度锋面与鱿鱼渔场的关系研究, Tseng等<sup>[7]</sup>通过中国台湾省秋刀鱼数据研究海洋温度锋对秋刀鱼渔场分布的影响。这些研究结果反映出海洋温度锋的时空变化, 对渔场中心、渔期和渔获量等均有影响。本研究利用已有西北太平洋秋刀鱼渔业资料, 结合卫星遥感数据, 分析秋刀鱼资源丰度和渔场分布时空变化特征, 根据秋刀鱼洄游特征, 比较分析海表温度锋的位置与资源丰度的关系, 重点揭示黑潮、亲潮汇流区温度锋与秋刀鱼渔场分布的关系, 为西北太平洋秋刀鱼渔业资源开发与管理提供参考。

### 1 材料与方法

#### 1.1 数据来源

本研究采用的渔业数据来自中国远洋渔业

收稿日期: 2018-02-24 修回日期: 2018-05-11

资助项目: “十二五”国家科技支撑计划(2013BAD13B05)

通信作者: 李晓峰, E-mail: xfli@shou.edu.cn

协会上海海洋大学秋刀鱼技术组, 主要作业海域为 $150^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$ ,  $38^{\circ}\sim 46^{\circ}\text{N}$ , 时间序列为2013年的7月–11月, 2014—2015年的每年6–11月, 时间分辨率为d, 数据内容包括作业年份、作业日期、作业次数、产量和经纬度等信息。遥感数据为海表面温度数据(sea surface temperature, SST), 该数据来源于美国国家海洋和大气管理局网站(<http://www.noaa.gov>), 为MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)、AMSR-E (Advanced Microwave Radiometer for EOS)和AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)等多卫星融合数据, 其空间分辨率为 $0.01^{\circ}\times 0.01^{\circ}$ , 时间分辨率为d。

## 1.2 研究方法

**CPUE和渔场重心** 单位捕捞渔获量(catch per unit effort, CPUE)定义为每艘船每天的捕捞产量, 单位t/d, 作为渔业资源丰度的指标。本研究采用渔场重心作为资源量的空间分布和变化指标<sup>[8]</sup>, 其计算公式:

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

式中 $X$ 、 $Y$ 分别为渔场月均重心的经度和纬度; $C_i$ 为作业点 $i$ 的产量; $X_i$ 为作业点 $i$ 的经度; $Y_i$ 为作业点 $i$ 的纬度; $n$ 为月作业的总次数。

**SSTG和温度锋** 海表温度梯度(sea surface temperature gradient, SSTG)利用梯度幅值公式求得<sup>[9-10]</sup>, 假设当前SST值为 $SST_{i,j}$ , 其相邻的4个网格点的SST分别为 $SST_{i+1,j}$ 、 $SST_{i-1,j}$ 、 $SST_{i,j+1}$ 、 $SST_{i,j-1}$ , 则

$$SSTG_{i,j} = \sqrt{\left(\frac{SST_{i+1,j} - SST_{i-1,j}}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{SST_{i,j+1} - SST_{i,j-1}}{\Delta y}\right)^2}$$

式中 $i$ 、 $j$ 为正整数, 分别表示网格数据行号和列号; $\Delta x$ 表示第 $j-1$ 列与第 $j+1$ 列之间经度方向的距离,  $\Delta y$ 表示第 $i-1$ 行与第 $i+1$ 行之间纬度方向的距离, 单位均为km。 $SSTG_{i,j}$ 表示当前点的SSTG值, 单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。本研究参考已有的温度锋判别标准<sup>[11]</sup>, 取 $SSTG > 0.05^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 为温度锋。

根据秋刀鱼的作业特点, 计算每个CPUE作业点与其最邻近的温度锋边缘的最短垂直距离( $D = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ ), 记作DIST (km), 来反映作业位置与温度锋的空间相关性(图1); 计算每个作业点半径100 km和25 km范围内的温度锋所占

面积之和与温度锋之和, 记为 $\text{AREA}_{100}(\text{km}^2)$ 、 $\text{AREA}_{25}(\text{km}^2)$ 和 $\text{SUM}_{100}(\text{C}/\text{km})$ 、 $\text{SUM}_{25}(\text{C}/\text{km})$ (SUM计算公式:  $\text{SUM} = \sum_{i=1}^n \text{SSTG}_i$ , 式中,  $\text{SSTG}_i$ 表示 $\text{SSTG} > 0.05^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的值), 来反映该作业点周围海域温度锋出现的频率及其强度变化。依据秋刀鱼的洄游特征, 计算全年、夏季和秋季洄游区域范围内的温度锋之和, 记作SUM-A ( $37^{\circ}\sim 49^{\circ}\text{N}$ ,  $145^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$ )、SUM-B ( $38^{\circ}\sim 46^{\circ}\text{N}$ ,  $147^{\circ}\sim 157^{\circ}\text{E}$ )和SUM-C ( $39^{\circ}\sim 48^{\circ}\text{N}$ ,  $157^{\circ}\sim 163^{\circ}\text{E}$ )。

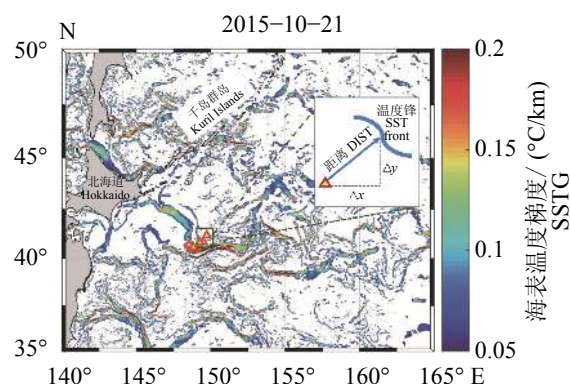


图1 海表温度锋与秋刀鱼作业位置距离示意图

Fig. 1 The distance between fishing location of saury and the temperature front

**GAM与频度分布** 广义可加模型(generalized additive models, GAM)为广义线性模型的非参数化扩展, 能够直接处理响应变量与多个解释变量之间的非线性关系, 也可以独立得出各解释变量对响应变量的影响效应<sup>[12]</sup>。本研究以CPUE为非独立变量, SST、SSTG、DIST、AREA和SUM分别作为解释变量建立GAM模型, 分析CPUE与各变量因子的关系。模型采用样条平滑法, 为了防止零值出现, 在CPUE上加上常数1, 再对其作对数变换, 作为响应变量, 误差分布估计为高斯分布<sup>[13]</sup>。

为了详细探讨CPUE与DIST相关性, 将DIST以不等分间隔进行频度直方图分析, 分别为5 km、25 km、50 km、100 km、200 km和大于200 km。对于SST和SSTG, 以季节作为时间划分依据进行计算, 研究中均以6—11月为全年, 6—8月为夏季, 9—11月为秋季。对于DIST与SUM以月份进行计算, 以发现其更详细的规律特征。使用方差分析进行 $F$ 检验和显著性水平检验, GAM计算采用R语言实现, 其他统计分析在MATLAB中实现。

## 2 结果

### 2.1 秋刀鱼作业CPUE与渔场时空分布

2013—2015年我国西北太平洋公海海域秋刀鱼的产量和CPUE在一定幅度内波动, 6—8月渔季初期的产量分别占当年产量的13.1%、18.3%和8.8%(图2), 到9月捕捞旺季开始, 产量突增,

9—11月的产量占当年产量的86.9%、81.6%和91.2%; 其中2014年为高产年, 产量高达33 554.51 t, 为2013年和2015年2年产量之和的1.5倍。从CPUE分析, 2014年和2015年的变化趋势一致, 即6—8月CPUE逐渐降低, 9—11月先增后降, 最低为8月, 最高为10月。其中, 2015年10月为最高, CPUE达39.02 t/d。

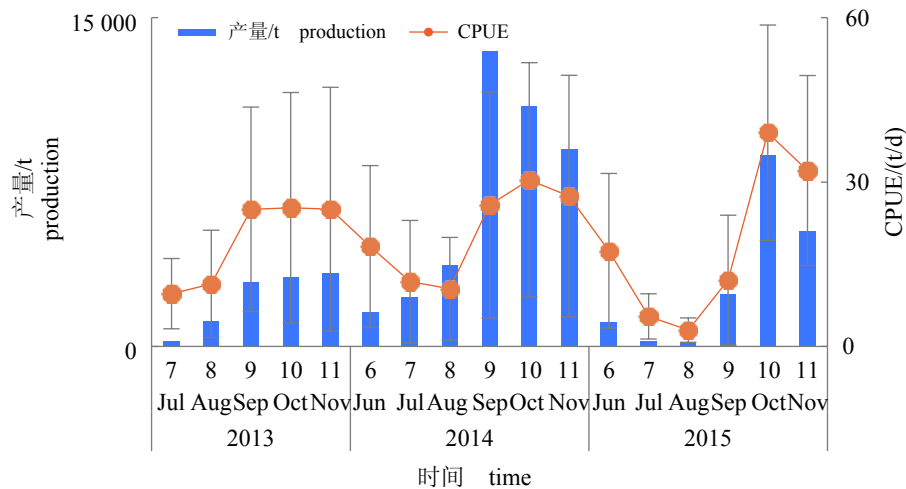


图2 西北太平洋秋刀鱼月产量和月均CPUE变化

Fig. 2 Monthly production and CPUEs in Northwestern Pacific Ocean *C. saira* fishery

通过对2013—2015年6—11月秋刀鱼渔场CPUE重心空间分布分析得出, 秋刀鱼作业渔场主要分布于37°~49°N, 145°~165°E(图3), 位于千岛群岛东南, 俄罗斯专属经济区线外侧。渔场重心在纬度方向上, 在6—8月份, 3年的变化趋势基本一致, 随着时间推移逐渐向北洄游, 秋季开始差别较大, 9—11月, 渔场重心平行于千岛群岛向南移动至北海道; 在经度方向上呈向

西移动的趋势, 秋季移动幅度较大, 总体呈现出向近海迁移的特征。其中, 2013年和2015年在9月和10月变动较大, 11月变动较小, 2014年与之相反, 作业区域集中在43°~44°N的时间较长。

### 2.2 SST与秋刀鱼CPUE的关系

在95%置信度下, GAM模型显示秋刀鱼CPUE受到SST的影响显著( $P < 0.05$ )(图4)。SST的影响在不同季节内呈现出不同的特征, 其中秋季(9—11月)SST对CPUE的影响强于夏季(6—8月)。6—11月, SST对CPUE的有效影响范围为10~17°C, 呈现双峰分布, 即温度小于10°C或温度大于17°C均不显著, 在10~14°C, CPUE随SST的上升呈下降的趋势; 在14~17°C, CPUE随SST上升呈上升趋势。夏季SST的有效影响范围为11~15°C, CPUE在11~13°C随SST上升而上升, 在13~15°C随SST上升而下降。秋季SST的有效影响范围为9~17°C, 该范围宽于夏季, 其峰值出现在11°C, CPUE在9~11°C随SST的上升而上升, 在11~17°C随SST升高而下降。GAM结果显示, 秋刀鱼生活的最佳SST范围, 夏季为12~14°C, 秋季为12.5~15°C, 6—11月为12.5~14.5°C。

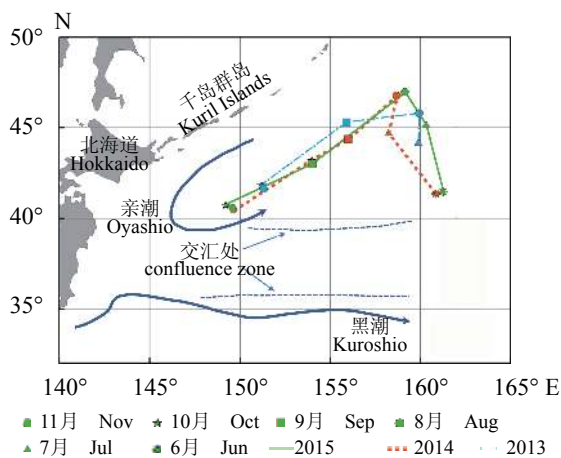


图3 渔场CPUE重心分布图

Fig. 3 Fishing ground centroids of *C. saira* fishery

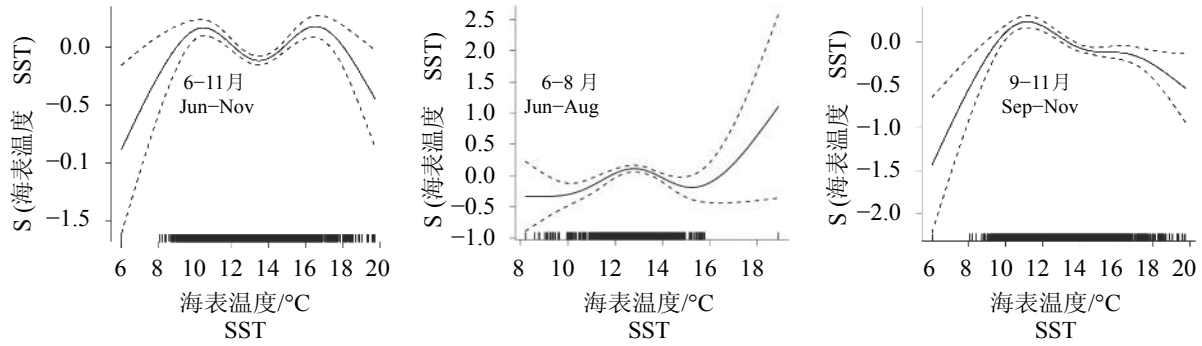


图 4 SST与CPUE关系的GAM分析图

S (变量)为光滑样条函数的拟合值, 表示其对CPUE的影响。虚线表示95%的置信区间, 实线表示拟合后平均值。下同

Fig. 4 GAM analysis of the relationship between SST and CPUE

S (variable) is the fitted value of smoothing spline functions, which represent their impacts on CPUE. Dashed lines indicate 95% confidence intervals, solid lines indicate mean of fitted data. The same below

### 2.3 SSTG与秋刀鱼CPUE的关系

在95%置信度下, GAM模型显示秋刀鱼CPUE受到SSTG的影响显著( $P < 0.05$ )(图5)。6—11月, SSTG对CPUE的有效影响范围为0~0.15 °C/km, 在0.01~0.06 °C/km范围内, CPUE随着SSTG增加而增大, 呈显著线性正相关趋势; 在0.06~0.15 °C/km范围内, 随SSTG增加CPUE增大趋势变缓, 呈非线性相关。夏季SSTG的有效影响范围为0.01~0.03 °C/km, CPUE随SSTG的上升而上升; 秋季SSTG的有效影响范围为0.01~0.13 °C/km, 显著影响范围集中在0.03~0.05 °C/km, 呈线性正相关趋势。GAM分析结果显示, 秋刀鱼生活的最佳SSTG范围, 夏季为0.01~0.02 °C/km, 秋季为0.03~0.04 °C/km, 6—11月为0.01~0.05 °C/km。期间夏季作业渔场的SSTG低于秋季。

### 2.4 温度锋与秋刀鱼CPUE的关系

温度锋与秋刀鱼CPUE的相关性分析

2013—2015年6—11月SUM与CPUE的相关关系显示, SUM-A、SUM-B、SUM-C与CPUE相关系数分别为0.81、0.72和0.66, 均具有极强的正相关性, 并通过显著性检验( $P < 0.01$ )(图6)。不同区域温度锋的变化趋势相似, 在3—5月和9—11月温度锋较强, 6—8月温度锋较弱, 其中4月和11月为一年中的两个峰值, 7月为最低值。C区的温度锋强度远高于B区, 6—8月, C区温度锋强度基本接近A区。SUM-A平均值为8 200 °C/km, 其中2015年高于2013和2014年, SUM与CPUE最高值均为2015年10月。温度锋之和随年份变化, 总体呈上升趋势, 而CPUE在秋季也呈增长趋势变化。

DIST对秋刀鱼CPUE的响应分析 在95%置信度下, GAM模型显示全年和秋季的DIST对CPUE的影响极显著( $P < 0.01$ ), 夏季影响不显著( $P > 0.05$ ), 秋季与全年的变化趋势一致(图7)。6—

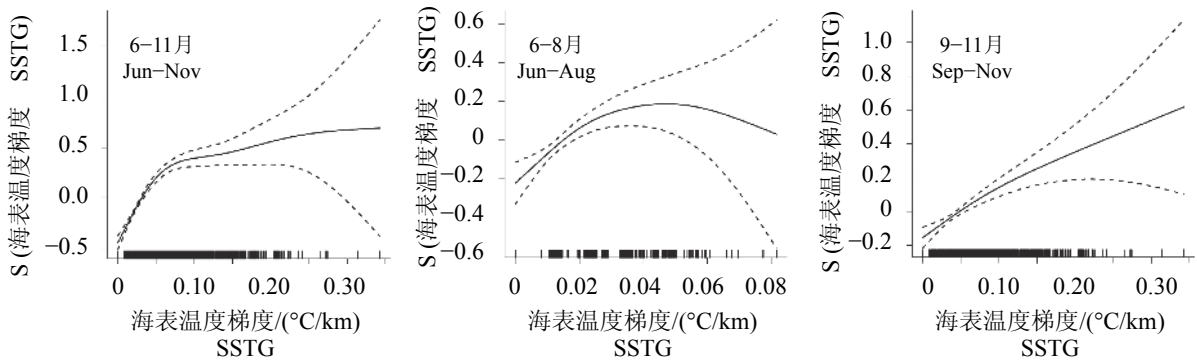


图 5 SSTG与CPUE关系的GAM分析图

Fig. 5 GAM analysis of the relationship between SSTG and CPUE

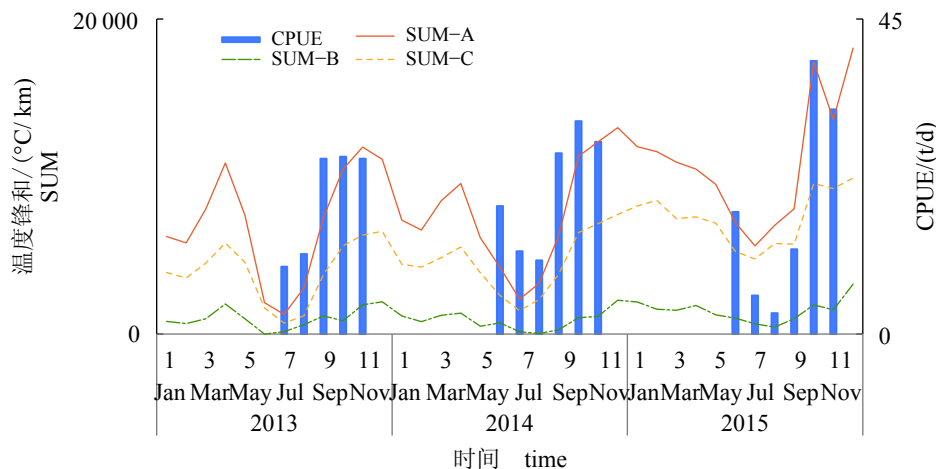


图6 SUM与CPUE相关性

Fig. 6 Correlation between SUM and CPUE

11月, 在DIST为0~25 km范围内, CPUE与DIST呈线性负相关, 随着DIST增加, CPUE显著下降, 在25~75 km范围呈线性逐渐减少, 在75~125 km范围呈平缓减少趋势, 在125~200 km范围继续随

DIST增大而逐渐减少。秋季在50~100 km范围呈平缓减少趋势, 超过100 km之外置信度较低, 二者没有显著相关关系。夏季DIST与CPUE呈线性负相关关系, 在50~100 km范围相关性最高。

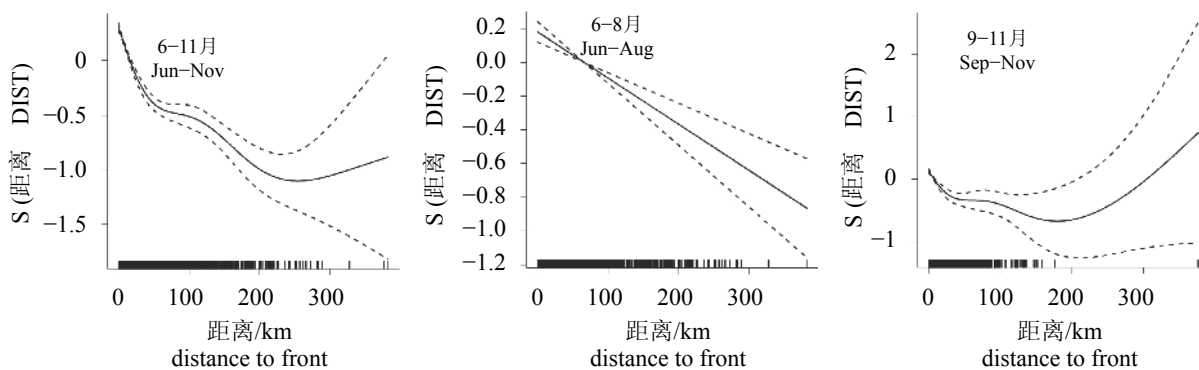


图7 DIST与CPUE关系的GAM分析图

Fig. 7 GAM analysis of the relationship between DIST and CPUE

距离DIST与CPUE关系的频度直方图显示, 在夏季6—8月, 2013年5~25 km为适宜距离, 距离超过100 km时, CPUE随DIST增加而递减(图8)。2014年在100 km内呈线性正相关( $R^2 > 0.85$ ), 距离超过100 km时CPUE随DIST增加而减少。2015年6月和7月的特征与2014年相似, 8月与2013年特征相似, 但距离达到200 km后开始骤减。在秋季9—11月, 不同年份的规律特征相似, CPUE与DIST呈对数负相关( $R^2 > 0.9$ ), 90%以上的作业点出现在DIST小于50 km范围内。前文通过产量分析显示, 秋季产量占70%以上, 以产量最高的2014年10月和CPUE最高的2015年10月为例, 分

别有60%和82%的作业点集中于DIST在5 km之内。

温度锋强度对秋刀鱼CPUE的响应分析

通过温度锋面积、温度锋之和与CPUE关系的GAM分析(图9), 发现AREA、SUM均与CPUE成正相关( $P < 0.01$ )。在95%置信度下, 相同半径范围的AREA、SUM变化趋势相似, SUM100对CPUE的有效影响范围为0~1 000 °C/km, AREA100对CPUE的有效影响范围为0~8 000 km<sup>2</sup>, 二者均与CPUE呈现正指数相关关系。当半径为25 km时, SUM和AREA均出现小范围的波动变化。SUM25对CPUE的有效影响范围为0~260 °C/km, 其与CPUE在0~70 °C/km呈线性正相关, 在90~

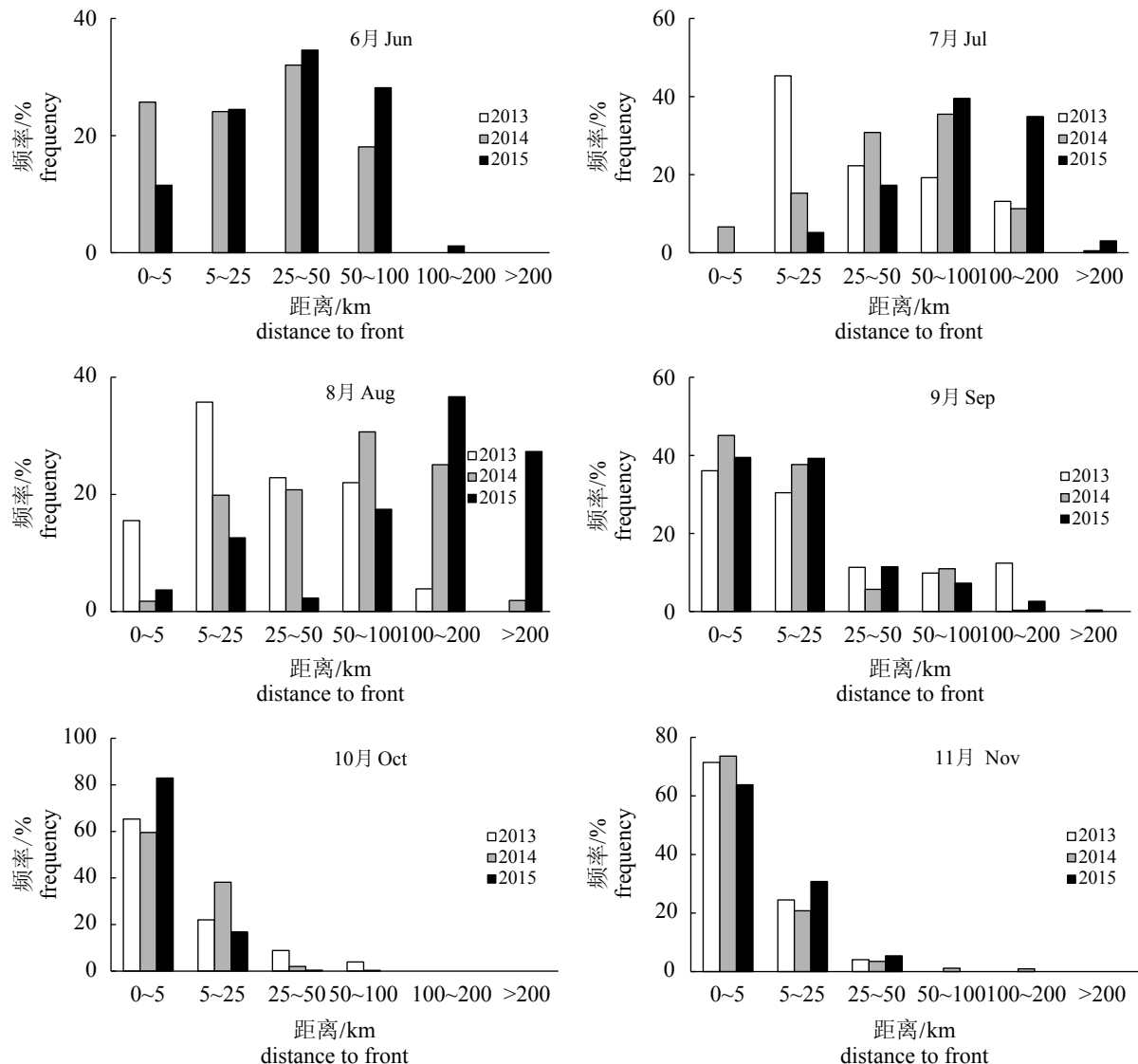


图 8 距离与CPUE关系的频度直方图

Fig. 8 Frequency histogram of the relationship between DIST and CPUE

150 °C/km呈负相关; AREA25对CPUE的有效影响范围为0~500 km<sup>2</sup>, 在0~300 km<sup>2</sup>与CPUE呈线性正相关。通过计算发现, 半径范围越大, CPUE与二者的相关性越强, 其中温度锋面积(AREA100,  $R^2=0.38$ )比温度锋之和的相关性(SUM100,  $R^2=0.37$ )略高。

本研究通过月平均SUM25占SUM100的百分, 比进一步反映在距离相同情况下, 温度锋强度与CPUE的关系, 得出二者的相关系数为0.63 (图10), 通过显著性检验( $P<0.01$ ), 除了2014年的6月、7月和8月为负相关关系, 其他月份均为正相关关系。其中夏季的百分比为5.6%, 秋季的百分比为7.5%。可见, 在锋面集中区域, 作业点距离锋面越近, CPUE值越高。

### 3 讨论

#### 3.1 SST对秋刀鱼渔场分布的影响

秋刀鱼为短周期洄游鱼类, 其适温范围为10~24 °C<sup>[14]</sup>。本研究中秋刀鱼适宜的SST范围为12.5~14.5 °C, SSTG对CPUE的有效影响范围为0~0.15 °C/km, 在0.01~0.05 °C/km, 呈线性正相关趋势, 与以往研究基本一致<sup>[15]</sup>。秋刀鱼对温度的响应呈季节性变化, 这直接影响着秋刀鱼的洄游路线。秋刀鱼一般从冬季到次年春季在日本列岛附近的黑潮暖水中产卵<sup>[1]</sup>, 随着水温的逐渐上升, 幼鱼越过黑潮与亲潮的交汇区向亲潮水域索饵洄游, 夏季到达千岛群岛沿岸亲潮区附近。在这期间, 秋刀鱼处于成长期, 同时在洄

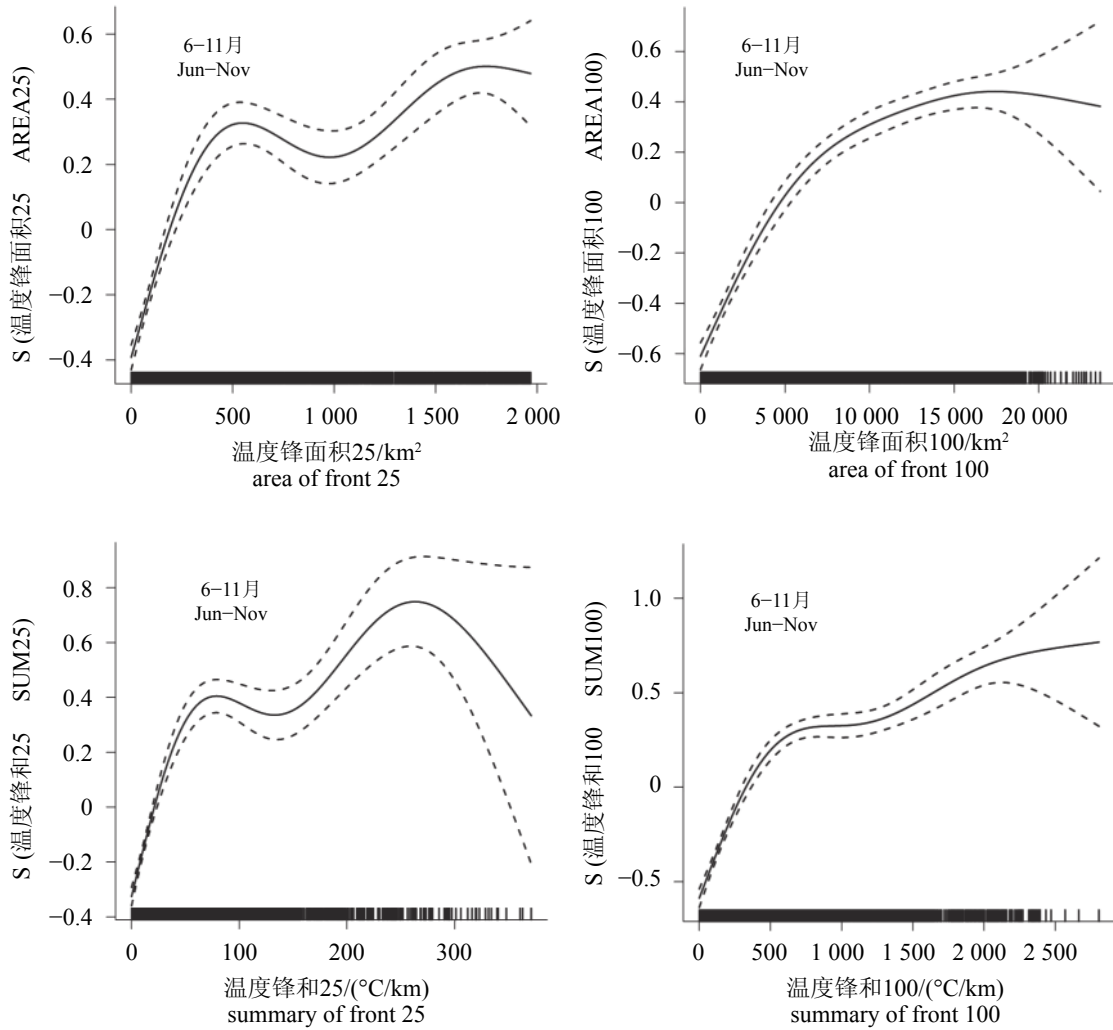


图 9 温度锋面积、温度锋和与CPUE关系的GAM分析图  
 Fig. 9 GAM of the relationship among AREA, SUM and CPUE

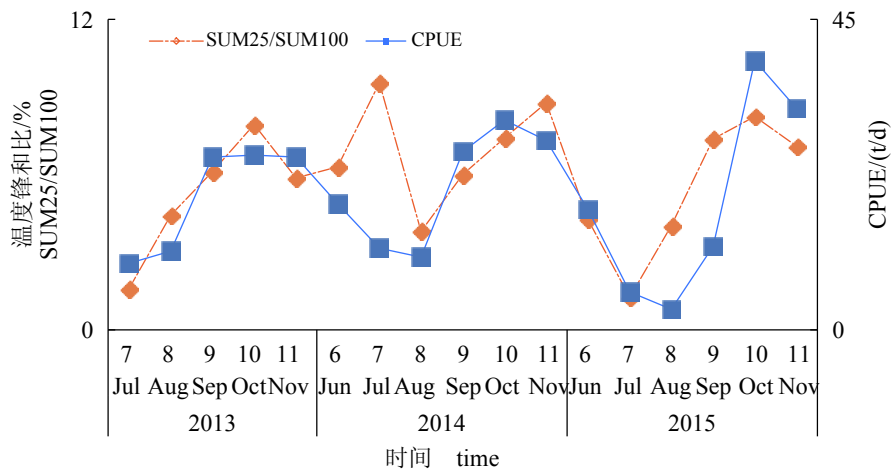


图 10 SUM25/SUM100与CPUE的相关性分析  
 Fig. 10 Correlation between CPUE and the ratio of SUM25 and SUM100

游过程不断改变方向寻找适宜温度<sup>[16]</sup>, 中心渔场不确定, 这导致渔船需要花费大量时间寻找渔

场, 而实际作业时间较短。因此, 6—8月的产量和CPUE都较低, 而且在此期间SST、SSTG以

及DIST规律特征不明显, 适宜温度略低于秋季成熟鱼群。而到夏末初秋, 秋刀鱼从亲潮水域南下向黑潮水域移动, 鱼群逐渐成熟, 在黑潮和亲潮交汇区域形成渔场, 盛渔期在这个时期形成, 鱼群集聚, 捕捞作业范围缩小。此时大量渔船直接进入作业区, 秋刀鱼的产量大幅度增加。本研究渔场重心位置移动符合以往研究中秋刀鱼洄游路线<sup>[1]</sup>, 并表现出相似的季节性特征。

### 3.2 温度锋对秋刀鱼渔场分布的影响

黑潮和亲潮分别为暖、冷水系, 二者在交汇区形成温度锋面, 锋面区常富集大量营养盐、形成高初级生产力海域<sup>[7]</sup>。通过本研究中不同区域温度锋的量化分析, 发现黑潮和亲潮交汇区的温度锋强度高于黑潮延伸体区域, 北太平洋秋刀鱼在黑潮和亲潮交汇区形成渔场, 与该海域的温度锋密切相关。春末(4月左右)和初冬(11月左右)海流交汇温差大, 易形成温度锋; 6—8月, 作业海域内温度锋偏弱, 秋刀鱼CPUE偏低, 9—11月, 温度锋增强, CPUE也随之升高, 与以往研究结果基本一致<sup>[7]</sup>。

Tseng等<sup>[7]</sup>认为秋刀鱼的作业位置越靠近水温锋面分布海域, CPUE越高, 但CPUE与最近的水温锋面距离呈现负相关。而本研究分析2013—2015年的温度锋面特征后得出, 作业海域温度锋面越活跃, CPUE越高; 在锋面集中区域, 作业位置距离锋面越近, CPUE值越高。不同的原因可能是对到锋面的距离定义不同, Tseng等<sup>[7]</sup>的距离为作业渔区到锋面中心位置, 本研究的距离

为作业点到锋面的边缘位置, 而一般锋面边缘区域海流流速较大, 鱼群不易集聚<sup>[18]</sup>, 本研究的结果可以较好地反映温度锋与渔场作业的位置特点。

本研究分析在2013—2015年, 每年的10月CPUE和作业海域的温度锋为最高, 尤其在2014年和2015年该特征显著。2015年10月21日(图11), 亲潮沿岸分支在40°~42°N, 148°~151°E与黑潮暖流交汇, 冷水楔入暖流区形成弯曲, 从而寒流性浮游生物被携带而入, 底层营养盐在锋区上升流和海水混合作用下被带到表层, 形成丰盛的饵料区域。而秋刀鱼属于冷水性洄游鱼类, 因此一般聚集在弯曲锋面较冷水的一侧。这与以往研究相似, Uda<sup>[16]</sup>认为, 秋刀鱼渔场中心在亲潮前锋附近的亲潮冷舌前端, 渔场呈椭圆形; Yasuda等<sup>[18]</sup>认为, 亲潮势力在夏季比较强, 鱼群的资源丰度比较好, 反之则相反; 若亲潮第二分支比较强而沿岸分支比较弱, 鱼群会比较分散, 渔场面积较大而渔获率却相对较低, 一般在外海可能会形成高产渔场。2014年10月25日(图11)就是亲潮第二分支比较强而沿岸分支比较弱, 因此当冷暖流交汇时并未形成弯曲, 鱼群大部分仍停留在9月的作业区域, 在交汇区的东北部有一势力相对较小的冷水楔, 鱼群在该处聚集。而2015年10月渔场在沿岸附近较早形成, 渔场集中, 捕捞作业范围也很集中。此外, 2015年渔场位置总体偏南, 也可能与大尺度气候变化有关。该年为较强厄尔尼诺年, 北太平洋秋刀鱼渔场海域水温较常年整体偏低, 从

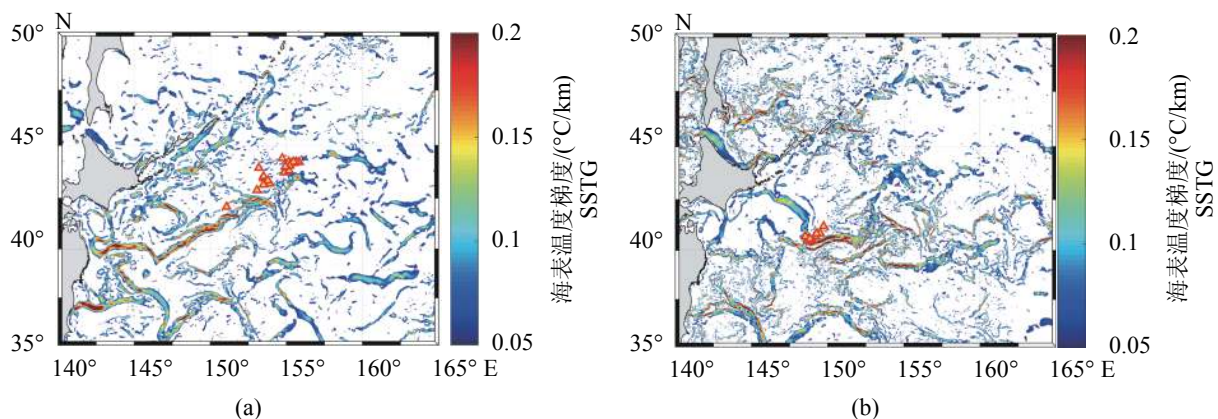


图 11 2014年10月25日(a)和2015年10月21日(b)温度锋图

红色三角形表示作业点位置, 下同

Fig. 11 Temperature fronts maps at Oct 25, 2014(a) and Oct 21, 2015(b)

The red triangles denote the locations of fishery, the same below



而导致渔场位置总体偏南。

本研究发现秋刀鱼群主要集中在冷水一侧(图12), 很少进入黑潮暖流区, 可见黑潮暖流对秋刀鱼群有一定的环境屏障作用, 这可能与交汇处形成的锋面涡旋有关, 涡旋中心的流速一

般较强, 因而鱼群集聚在冷水楔的气旋涡边缘。通常锋面弯曲具有10~14 d的周期特征<sup>[19]</sup>, 因此这种冷水楔形成的弯曲锋面涡旋现象常常在10月中旬形成, 11月逐渐消失, 秋刀鱼渔场中心也随洄游移动变化。

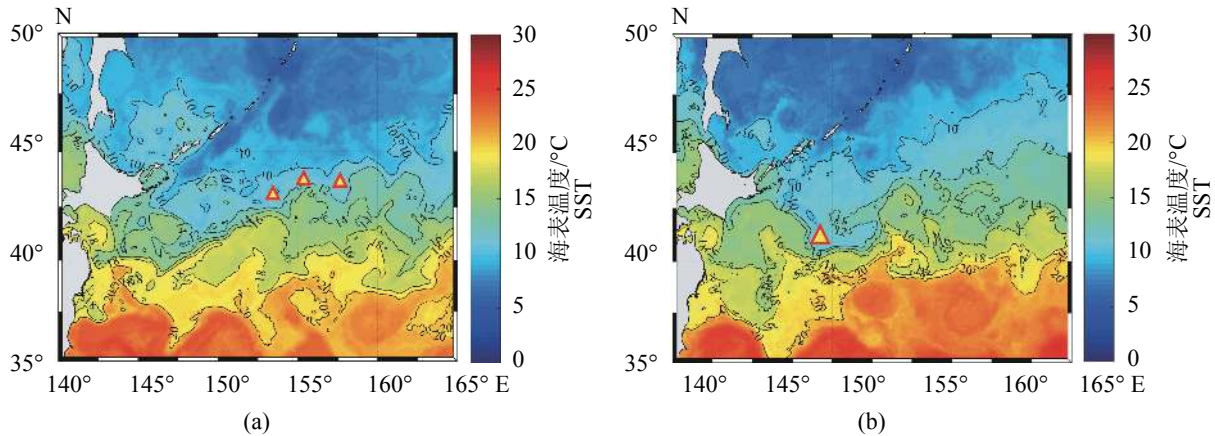


图 12 2014年10月25日(a)和2015年10月21日(b)海表温度图

Fig. 12 Sea surface temperature maps at Oct 25, 2014(a) and Oct 21, 2015(b)

由此可见, 一方面, 黑潮、亲潮及黑潮延伸体的时空变化影响西北太平洋的海表温度, 从而影响秋刀鱼的洄游路线; 另一方面它们之间的相互交汇作用, 形成海洋温度锋面, 秋刀鱼集群, 形成渔场。另外, 大尺度气候变化也影响着渔场的变动<sup>[20]</sup>。今后将进一步开展该区域海洋动力环境特征研究, 这将有助于秋刀鱼洄游与集群规律的研究, 为西北太平洋秋刀鱼渔业提供技术支撑, 提高远洋渔业生产效率和经济效益。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Tian Y J, Ueno Y, Suda M, *et al.* Decadal variability in the abundance of Pacific saury and its response to climatic/oceanic regime shifts in the northwestern subtropical Pacific during the last half century[J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 52(1-4): 235-257.
- [ 2 ] 谢斌, 汪金涛, 陈新军, 等. 西北太平洋秋刀鱼资源丰度预报模型构建比较[J]. *广东海洋大学学报*, 2015, 35(6): 58-63.  
Xie B, Wang J T, Chen X J, *et al.* Forecasting model of abundance index for *Cololabis saira* in the Northwest Pacific Ocean[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2015, 35(6): 58-63(in Chinese).
- [ 3 ] Achmad F S, Saitoh S I, Alabia I D, *et al.* Predicting potential fishing zones for Pacific saury (*Cololabis saira*) with maximum entropy models and remotely sensed data[J]. *Fishery Bulletin*, 2016, 114(3): 330-342.
- [ 4 ] Watanabe Y. Recruitment variability of small pelagic fish populations in the kuroshio-oyashio transition region of the western north pacific[J]. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, 2009, 41: 197-204.
- [ 5 ] 任诗鹤, 王辉, 刘娜. 中国近海海洋锋和锋面预报研究进展[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(5): 552-563.  
Ren S H, Wang H, Liu N. Review of ocean front in Chinese marginal seas and frontal forecasting[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(5): 552-563(in Chinese).
- [ 6 ] 范秀梅, 伍玉梅, 崔雪森, 等. 北太平洋叶绿素和海表温度锋面与鱿鱼渔场的关系研究[J]. *渔业信息与战略*, 2016, 31(1): 44-53.  
Fan X M, Wu Y M, Cui X S, *et al.* Relation between chlorophyll II and SST fronts of the North Pacific and the distribution of squid fishing grounds[J]. *Fishery Information & Strategy*, 2016, 31(1): 44-53(in Chinese).
- [ 7 ] Tseng C T, Sun C L, Belkin I M, *et al.* Sea surface temperature fronts affect distribution of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the Northwestern Pacific Ocean[J].

- Deep Sea Research-Part II: Topical Studies in Oceanography, 2014, 107: 15-21.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] Pi Q L, Hu J Y. Analysis of sea surface temperature fronts in the Taiwan Strait and its adjacent area using an advanced edge detection method[J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53(7): 1008-1016.
- [10] 崔雪森, 周为峰, 王栋, 等. 海面温度栅格图的锋面提取与矢量化[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(11): 1384-1390.
- Cui X S, Zhou W F, Wang D, *et al.* Fronts extraction and vectorization from raster image of sea surface temperature[J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(11): 1384-1390(in Chinese).
- [11] 汤毓祥. 初论东海黑潮锋的区域性差异[J]. 黄渤海海洋, 1992, 10(3): 1-9.
- Tang Y X. On regional difference of the Kuroshio front in the East China Sea[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1992, 10(3): 1-9(in Chinese).
- [12] 田思泉, 陈新军, 冯波, 等. 西北太平洋柔鱼资源丰度与栖息环境的关系及其时空分布[J]. 上海海洋大学学报, 2009, 18(5): 586-592.
- Tian S Q, Chen X J, Feng B, *et al.* Spatio-temporal distribution of abundance index for *Ommastrephes bartramii* and its relationship with habitat environment in the Northwest Pacific Ocean[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2009, 18(5): 586-592(in Chinese).
- [13] Howell E A, Kobayashi D R. El Niño effects in the Palmyra Atoll region: oceanographic changes and bigeye tuna (*Thunnus obesus*) catch rate variability[J]. Fisheries Oceanography, 2006, 15(6): 477-489.
- [14] 孙满昌, 叶旭昌, 张健, 等. 西北太平洋秋刀鱼渔业探析[J]. 海洋渔业, 2003, 25(3): 112-115.
- Sun M C, Ye X C, Zhang J, *et al.* Probe into Pacific saury fisheries in the Northwest Pacific[J]. Marine Fisheries, 2003, 25(3): 112-115(in Chinese).
- [15] 张孝民, 朱清澄, 花传祥. 2013年北太平洋公海秋刀鱼渔场与海洋环境的关系[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(5): 773-782.
- Zhang X M, Zhu Q C, Hua C X. Fishing ground distribution of saury and its correlation with marine environment factors in the Northern Pacific high sea in 2013[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(5): 773-782(in Chinese).
- [16] 宇田道隆. 千叶以北の秋刀鱼渔场的移动について[J]. 水产物理谈话会报, 1930, 23: 1-43.
- Uda Michitaka. Fishing ground distribution of saury about the north of Chiba[J]. Journal of Fisheries Physical, 1930, 23: 1-43(in Japanese).
- [17] 朱清澄, 夏辉, 花传祥, 等. 西北太平洋公海秋刀鱼夏季索饵场浮游动物的分布[J]. 水产学报, 2008, 32(6): 890-898.
- Zhu Q C, Xia H, Hua C X, *et al.* Abundance distribution of zooplanktons in Pacific saury (*Cololabis saira*) summer feeding grounds of the northwestern Pacific Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(6): 890-898(in Chinese).
- [18] Yasuda I, Watanabe Y. On the relationship between the Oyashio front and saury fishing grounds in the North - Western Pacific: a forecasting method for fishing ground locations[J]. Fisheries Oceanography, 1994, 3(3): 172-181.
- [19] 郭炳火, 万邦君. 东海海洋锋的波动及演变特征[J]. 黄渤海海洋, 1995, 13(2): 1-10.
- Guo B H, Wan B J. Wavelike features and evolution of the oceanic fronts in the East China Sea[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1995, 13(2): 1-10(in Chinese).
- [20] 余为, 陈新军, 易倩. 不同气候模态下西北太平洋柔鱼渔场环境特征分析[J]. 水产学报, 2017, 41(4): 525-534.
- Yu W, Chen X J, Yi Q. Analysis of variations in the environmental conditions on the fishing ground of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific Ocean under different climate modes[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(4): 525-534(in Chinese).

## Relationship between *Cololabis saira* fishery distribution patterns and sea surface temperature front in the Northwestern Pacific Ocean

LIU Yu<sup>1</sup>, ZHENG Quanan<sup>2</sup>, LI Xiaofeng<sup>1\*</sup>

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

2. Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland, Maryland 20742, USA)

**Abstract:** Pacific saury (*Cololabis saira*) fishery in North Pacific Ocean (NPO) is one of the most important components for Chinese fishery industry. The distribution of fishery is significantly related to the sea surface temperature (SST) and its variations. In this study, the sea surface temperature gradient (SSTG) and temperature fronts are derived from SST remote sensing data. In addition, data from Chinese saury fishery in the NPO during 2013 to 2015 (not including the fishery data of Chinese Taipei) are used to analyze the spatial and temporal relationship between the temperature front and the saury abundance. The results show that the main Saury fishing grounds are mainly located in 37°–49°N, 145°–165°E. The catch per unit effort (CPUE) is negatively related to the SST in the range of 10–14 °C. In contrast, CPUE increases with the sea surface temperature in the range 14–17 °C. The most suitable temperature is between 12.5–14.5 °C. The CPUE is significantly linear positively correlated with SSTG in the range of 0.01–0.06 °C/km, then the best range of SSTG is 0.01–0.05 °C/km. Furthermore, the locations of fronts of the study area are also positively correlated with CPUE with the high correlation coefficient of 0.81. The distance (DIST) between CPUE and front shows seasonal variations. During Jun–Aug, when DIST less than 100 km, CPUE displays a positive relationship to DIST with  $R^2$  of 0.85. CPUE negatively correlates with DIST and the  $R^2$  is 0.9 during Sep–Nov, when the 90% fishing grounds are concentrated within the area, the DIST is less than 50 km. Results show that the SST significantly affects the migratory distributions of saury fishery. Cold water wedges and temperature fronts are concentrated near the intersection of Kuroshio and Oyashio, where the group of saury is clustered to form a high-yield fishing ground.

**Key words:** *Cololabis saira*; sea surface temperature gradient; temperature fronts; Northwestern Pacific Ocean

**Corresponding author:** LI Xiaofeng. E-mail: xfli@shou.edu.cn

**Funding projects:** National Science & Technology Pillar Program during the Twelfth Five-year Plan Period (2013BAD13B05)