

DOI: 10.12264/JFSC2020-0257

黄渤海蓝点马鲛双船拖网渔业 CPUE 时空变化及其标准化

马亚宸¹, 徐宾铎^{1, 2, 3}, 张崇良^{1, 2, 3}, 于华明⁴, 薛莹^{1, 2, 3}, 任一平^{1, 2, 3}

1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237;
3. 海州湾渔业生态系统教育部野外科学观测研究站, 山东 青岛 266003;
4. 中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100

摘要: 根据 2012—2018 年山东省海洋捕捞渔业信息船的生产统计数据, 分析了黄渤海蓝点马鲛(*Scomberomorus niphonius*)双船拖网渔业名义单位捕捞努力量渔获量(CPUE)和渔场重心的时空变化, 结合表层水温等海洋环境因子, 应用广义可加模型(GAM)分析了蓝点马鲛双船拖网渔业名义 CPUE 与时空及环境因子的关系, 并对 CPUE 进行标准化。结果表明, 蓝点马鲛名义 CPUE 和渔场重心存在明显的年际和月变化; 名义 CPUE 在 2012—2018 年间呈波动下降趋势, 每年在 9—11 月出现最大值。渔场重心的月变化呈现从东南到西北再转向东南的趋势, 这与蓝点马鲛的洄游规律相一致。渔场重心呈现一定的年变化, 其经度变化与水温变化趋势相反, 纬度变化与水温变化趋势相同。GAM 模型分析表明, 年份、表层水温、经度和纬度对名义 CPUE 有极显著影响, 其中年份对名义 CPUE 影响最显著, 名义 CPUE 随着表层水温升高呈上升趋势。标准化 CPUE 与名义 CPUE 具有相似变化趋势, 但标准化 CPUE 波动幅度较小, 且其值均小于名义 CPUE。

关键词: 蓝点马鲛; 时空分布; CPUE 标准化; 广义可加模型; 黄渤海

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)04-0493-10

蓝点马鲛(*Scomberomorus niphonius*)隶属于鲈形目(Perciformes)、鲭科(Scombridae)、马鲛属(*Scomberomorus*), 为暖温性、长距离洄游的大型中上层鱼类, 在中国的渤海、黄海和东海广泛分布^[1]。近年来, 黄渤海传统经济渔业资源普遍衰退, 蓝点马鲛是唯一一年产量超过 10×10^4 t 的大型经济鱼类资源, 其经历了从开发不足到捕捞过度最终进入资源管理阶段的过程, 现渔业生产主要以秋汛捕捞当年补充群体为主^[2]。

了解和掌握渔业资源变动、渔场时空分布及其与海洋环境的关系对于渔业资源的可持续利用和科学管理具有重要意义。在渔业资源评估中, 科学调查的成本高、效率低, 并且难以实现大范围的同步调查测量, 而渔业生产数据因其成本

低、时空跨度大等优势, 常被用来分析渔业资源的状况^[3-4]。国内学者对蓝点马鲛的资源动态^[2, 5-6]、渔场分布以及渔场与水温、盐度等环境因子之间的关系^[7-11]等方面进行过研究。

通常认为单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE)与渔业资源丰度成比例, 可用来反映渔业资源丰度的大小^[12]。因渔业生产受到时间、空间、渔船参数、渔具效率和海洋环境等多种因素影响, 由渔业生产数据直接计算的名义 CPUE 不能完全反映渔业资源真实情况^[13-14]。名义 CPUE 需要进行标准化以去除相关因素的影响, 从而来反映渔业资源变化, 以了解真实资源情况^[15-16]。

广义可加模型(generalized additive model, GAM)^[17]是一种非参数化的广义多元线性回归方

收稿日期: 2020-08-18; 修订日期: 2020-09-27.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0900904); 山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0501-2).

作者简介: 马亚宸(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事渔业资源生态学研究. E-mail: myc@ouc.edu.cn

通信作者: 任一平, 教授, 主要从事渔业资源生态学研究. E-mail: renyip@ouc.edu.cn

法,相较于传统的线性回归模型具有不依赖参数分布、完全由数据驱动的优点,可以更灵活处理高维数据中响应变量与解释变量之间的关系。近年来 GAM 已广泛运用于渔业资源时空分布与环境因子关系以及 CPUE 标准化等研究中^[3,18-20],例如,宋超等^[21]使用 GAM 模型分析了象山港蓝点马鲛鱼卵、仔稚鱼的时空分布与环境因子的关系;Li 等^[22]以蓝点马鲛流网为例,比较了 GAM、回归树(regression trees)和随机森林(random forests)等 6 种模型在 CPUE 标准化研究中的效果。

本研究根据 2012—2018 年山东省海洋捕捞渔业信息船的生产统计数据,分析了黄渤海蓝点马鲛双船拖网渔业名义 CPUE 和渔场重心的时空分布,结合表层水温等海洋环境数据,应用 GAM 模型分析了名义 CPUE 与时空及环境因子的关系,并对 CPUE 进行标准化,以期为黄、渤海蓝点马鲛资源的合理利用和科学管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究所用数据来源于 2012—2018 年山东省海洋捕捞渔业信息船的渔捞日志,渔捞日志数据包括作业渔区、渔船功率、作业方式、作业日期、渔获种类和产量等。本文选择蓝点马鲛双船拖网作业信息(表 1),时间分辨率为日,空间分辨率为 0.5°×0.5°(即 1 个渔区),用渔区中心经纬度表示作业渔区位置。

海洋环境数据模拟应用 FVCOM 模型^[23]。针

表 1 2012—2018 年蓝点马鲛双船拖网渔业生产数据统计

Tab. 1 Statistics of fishery data record of pair trawler for *Scomberomorus niphonius* in 2012-2018

年份 year	月份 month	双拖船数量 number of pair trawler	经度范围/°E longitude range	纬度范围/°N latitude range
2012	1-5, 9-12	21	120.40-125.25	32.25-39.25
2013	2-5, 9-12	56	119.25-123.75	35.20-38.75
2014	1-5, 9-12	46	118.75-123.75	35.25-38.75
2015	4-5, 9-12	22	119.75-123.75	34.25-38.75
2016	1, 4-5, 9-12	49	119.65-124.25	33.25-38.75
2017	2-4, 9-12	9	118.75-125.75	32.75-38.75
2018	9-12	7	120.25-124.25	31.25-37.25

对黄渤海建立高分辨率三维数值模型,计算区域完整包含了蓝点马鲛双船拖网作业所涉及的海域,并根据历史实测数据对拟合数据进行了验证。环境数据包括表层水温(sea surface temperature, SST)、表层盐度(sea surface salinity, SSS)和水深(depth),时间分辨率为日,空间分辨率为 0.05°×0.14°(经度×纬度)。由于环境数据的分辨率高于渔业数据的分辨率,本文对各渔区内的环境数据取平均值,使环境数据与蓝点马鲛渔业生产数据的时空分辨率相匹配。

1.2 分析方法

1.2.1 名义 CPUE 的计算 本文中名义 CPUE_j 定义为渔区 j 平均每天每千瓦的渔获量[kg/(kW·d)],计算公式为:

$$CPUE_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} C_{ij}}{\sum_{i=1}^{n_j} p_i \times d_{ij}}$$

式中, C_{ij} 表示渔船 i 在渔区 j 的月总渔获量(kg), p_i 表示作业渔船 i 的功率(kW), d_{ij} 表示某月内渔船 i 在渔区 j 的作业天数, n_j 表示某月内在渔区 j 所有作业渔船的数量。

本文中研究海域的年平均名义 CPUE 为该年内各月各渔区名义 CPUE 的平均值;月平均名义 CPUE 为该月内各渔区名义 CPUE 的平均值。

1.2.2 渔场重心的表达及其与 SST 的关系 以名义 CPUE 为权重计算经纬度的加权平均值作为各月渔场重心,分析渔场重心经、纬度的变化趋势。渔场重心计算公式为^[24]:

$$X = \frac{\sum_{j=1}^m CPUE_j \times X_j}{\sum_{j=1}^m CPUE_j}, Y = \frac{\sum_{j=1}^m CPUE_j \times Y_j}{\sum_{j=1}^m CPUE_j}$$

式中, X、Y 分别为渔场重心的经度和纬度, CPUE_j 为渔区 j 的名义 CPUE, X_j 为渔区 j 中心点的经度, Y_j 为渔区 j 中心点的纬度, m 为渔区的总个数。

以 2012 年和 2017 年作为代表年份,分析蓝点马鲛渔场重心的月变化。选择 4 月、9 月和 12 月作为春季、秋季和冬季的代表月份,分析不同季

节的蓝点马鲛渔场重心的年变化。分析 2012—2018 年渔场重心经纬度距平和表层水温距平的年变化, 了解渔场重心变化与水温变化的关系。

1.2.3 名义 CPUE 进行标准化 GAM 模型是一种非参数化的广义多元线性回归方法, 可表示响应变量和解释变量的非线性关系, 其一般表达式为^[17]:

$$g(Y) = \beta + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \varepsilon$$

式中, g 为连接函数(link function), β 为截距项, $f_i(x_i)$ 为用来描述 $g(Y)$ 与第 i 个解释变量关系的非参数函数, n 为参数个数, ε 为误差项。

本文采用 $Y = \ln(\text{CPUE} + 1)$ 作为响应变量, 可对数据进行正态化处理^[25]。年份、月份、表层水温、表层盐度、水深、经度和纬度作为解释变量, 其中年份和月份为分类离散变量, 其他为连续变

量。模型的误差分布估计为高斯分布。

利用 AIC (Akaike information criterion) 准则检验模型拟合程度, 其值越小, 则拟合度越高^[26]。利用卡方检验来评估各因子对响应变量影响的显著性^[27]。模型构建过程通过 R3.5.1 软件^[28]实现。

2 结果与分析

2.1 名义 CPUE 的时间变化

2012—2018 年蓝点马鲛双船拖网渔业名义 CPUE 存在明显的月变化(图 1a)。除 2012 年 3—4 月的名义 CPUE 值较大外, 每年在 9 月出现峰值, 9—11 月的名义 CPUE 较高。年名义 CPUE 在 2012—2013 年间比较稳定, 2014 年最大为 52.05 kg/(kW·d), 2015 年名义 CPUE 值减小, 2016 年趋势有所回升, 但 2017 和 2018 年名义 CPUE 较低, 从年份上看整体呈下降趋势(图 1b)。

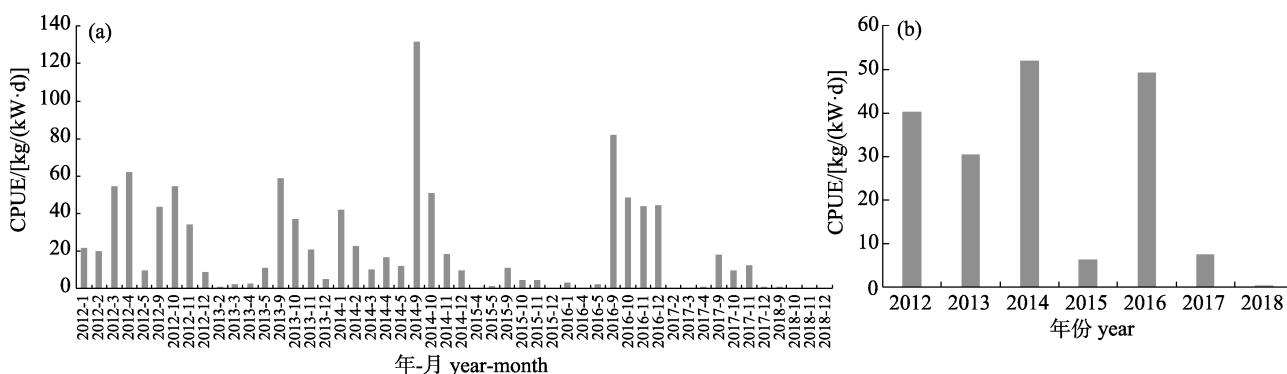


图 1 2012—2018 年蓝点马鲛名义 CPUE 月变化(a)和年变化(b)

Fig. 1 Monthly (a) and annual (b) variation in nominal CPUE of *Scomberomorus niphonius* in 2012-2018

2.2 渔场重心的时空变化

蓝点马鲛渔场重心分布呈现一定的月变化(图 2)。以 2012 年和 2017 年为例, 渔场重心主要分布在 122.5°E~125°E、33°N~36°N 海域, 两个年份均经历了上半年由东南移向西北、下半年再转向东南的变化趋势。1 月和 2 月渔场重心位于黄海南部大沙渔场 124.5°E、33.5°N 周边海域, 3—4 月向西北方向移动, 5 月到达最西北海域, 约在黄海西北部 122.7°E、36°N 位置。9—11 月持续向东南方向移动, 从石岛渔场移动到连青石渔场和连东渔场, 12 月到达最东南端。2017 年渔场重心比 2012 年整体位置偏东偏北。

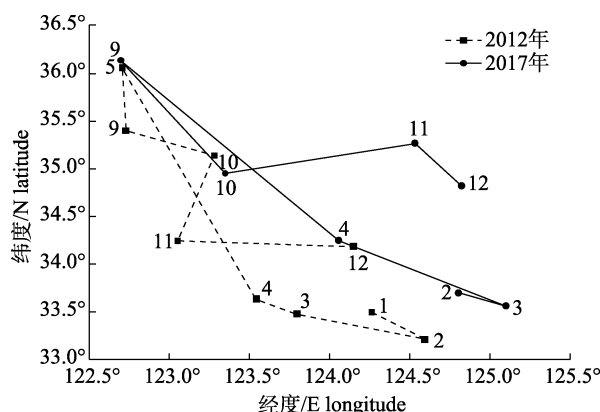


图 2 黄渤海蓝点马鲛双船拖网渔业渔场重心的月变化
Fig. 2 Monthly variation of barycenter of fishing ground for *Scomberomorus niphonius* pair trawler fishery in the Yellow and Bohai Seas

蓝点马鲛渔场重心分布呈现一定年变化(图 3)。2012—2018 年 4 月渔场重心主要分布在 122°E~124°E、33.5°N~36°N 海域, 9 月渔场重心主要分布在 121.5°E~123°E、35°N~37°N 海域, 12 月渔场重心主要分布在 121°E~125°E、34°N~36°N 海域。渔

场重心年间变化范围在 12 月最大, 9 月最小。除 2015 年有不同趋势外, 渔场重心的年变化在 3 个月份大致呈现相同规律, 2012—2013 年重心向北, 2013—2014 年重心向南, 2016—2017 年重心向南, 2017—2018 年重心向西。

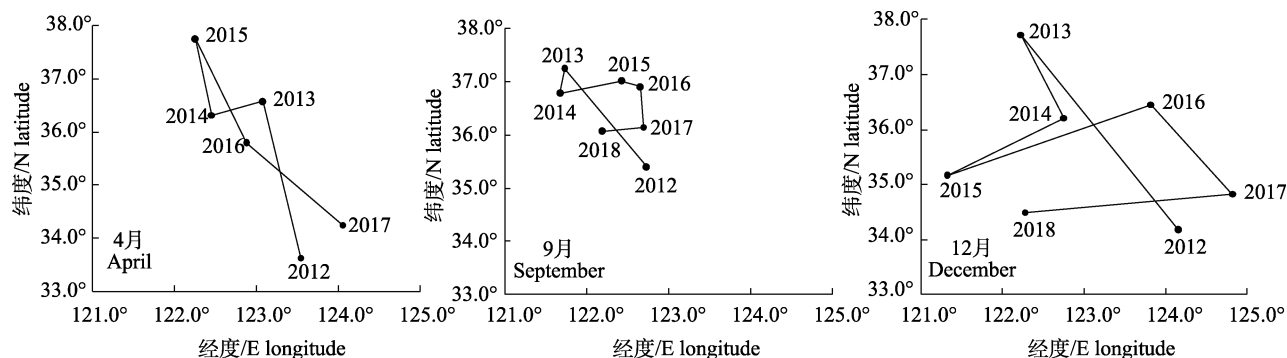


图 3 黄渤海蓝点马鲛双船拖网渔业渔场重心的年变化

Fig. 3 Annual variation of barycenter of fishing ground for *Scomberomorus niphonius* pair trawler fishery in the Yellow and Bohai Seas

2.3 渔场重心的空间变化与 SST 的关系

渔场重心变化与表层水温变化存在一定关系。在 4 月、9 月和 12 月均大致呈现以下变化规律: 当水温大于平均值时, 重心经度一般小于平均值, 纬度一般大于平均值; 当水温小于平均值时, 重心经度一般大于平均值, 纬度一般小于平均值, 即重心经度变化与水温变化相反, 重心纬度变化与水温变化相同(图 4)。

2.4 GAM 模型构建及效果

利用 Pearson 相关分析对因子进行检验, 表层盐度和月份、表层水温间存在极显著相关性(相关系数 >0.7 , $P<0.05$), 故舍去表层盐度, 将其他因子加入模型。通过逐步分析, 获得 GAM 最适模型为:

$$\ln(\text{CPUE}+1) = \text{year} + s(\text{SST}) + s(\text{longitude}) + s(\text{latitude}) + \varepsilon$$

该模型对名义 CPUE 的偏差解释率为 36.2%, 年份、表层水温、经度和纬度为极显著性变量($P<0.01$), 其中年份对名义 CPUE 的影响最大, 解释了 20.8%, 其次是表层水温(8.8%)、经度(4.7%)、纬度(1.9%)(表 2)。

2.5 名义 CPUE 与解释变量的关系

蓝点马鲛名义 CPUE 在 2012—2018 年间变化显著, 波动中呈下降趋势。2014 年名义 CPUE 最高, 2018 年最低。表层水温对名义 CPUE 影响显

著, 名义 CPUE 在 5~12 °C 间略微有所下降, 在 12~25 °C 间随着温度的升高而增大。名义 CPUE 随着纬度变化呈现中间高两边低的变化趋势, 在 33.5~38°N 间名义 CPUE 较高。名义 CPUE 随着经度变化较平缓, 在 119°E~121°E 间呈上升趋势, 121°E~123°E 略微下降后又逐渐上升(图 5)。

2.6 名义 CPUE 和标准化 CPUE 的比较

根据 GAM 最适模型求得标准化后的 CPUE 值, 与名义 CPUE 进行比较。由图 6 可知, 标准化 CPUE 和名义 CPUE 的变化趋势相似, 均在 2014 年出现最大值, 2018 年出现最小值。名义 CPUE 年间波动较大且无规律, 而标准化 CPUE 呈现波动中逐渐下降的趋势。标准化 CPUE 波动幅度更小, 且其值均小于名义 CPUE。2012—2014 年、2016 年的名义 CPUE 与标准化 CPUE 差异较大, 而 2015 年、2017—2018 年的名义 CPUE 和标准化 CPUE 值差异较小。

3 讨论

3.1 蓝点马鲛名义 CPUE 的时空变化

本文研究表明, 蓝点马鲛双船拖网渔业名义 CPUE 存在明显的年变化和月变化。2012—2018 年蓝点马鲛名义 CPUE 值在波动中呈现整体下降

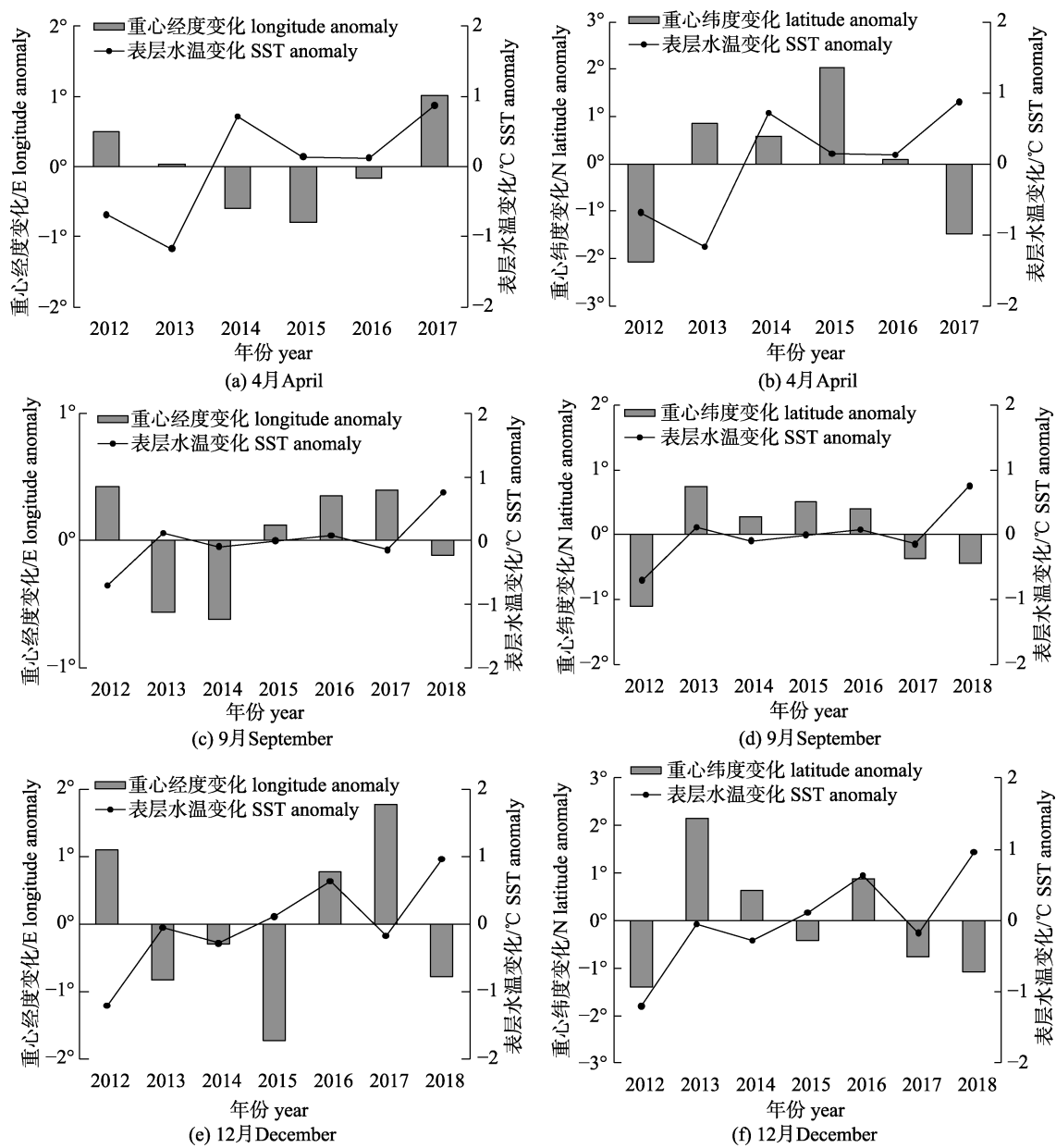


图 4 蓝点马鲛渔场重心经纬度变化与表层水温变化的关系

Fig. 4 Relationship between anomaly of latitude or longitude of fishing ground for *Scomberomorus niphonius* pair trawler fishery and SST anomaly

表 2 模型拟合结果及各解释变量重要性
Tab. 2 Results from model fitting and analysis of important explanatory variables

加入的解释变量 added explanatory variables	累积偏差解释率/% accumulation of deviance explanation	贡献率 importance	卡方检验 P_t	AIC
null				
+year	20.8	20.8	<0.01***	3247.2
+s(SST)	29.6	8.8	<0.01***	3148.3
+s(longitude)	34.3	4.7	<0.01***	3096.3
+s(latitude)	36.2	1.9	<0.01***	3080.6

注: ***表示差异极显著($P<0.01$).
Note: *** indicates extremely significant differences ($P<0.01$).

的趋势, 这与《中国渔业统计年鉴》(2014—2019)^[29-34]中 2012—2018 年蓝点马鲛海洋捕捞产量变化趋势相同。蓝点马鲛名义 CPUE 每年均在 9 月出现峰值, 9—11 月的名义 CPUE 值高于其他月份。邱盛尧等^[35]研究表明 1976 年前蓝点马鲛渔业以春汛生产为主, 随后以秋汛渔获量为主, 而春汛渔获量在低水平上波动。

蓝点马鲛渔场重心的月变化明显, 呈现上半年由东南移向西北、下半年再转还东南的移动规

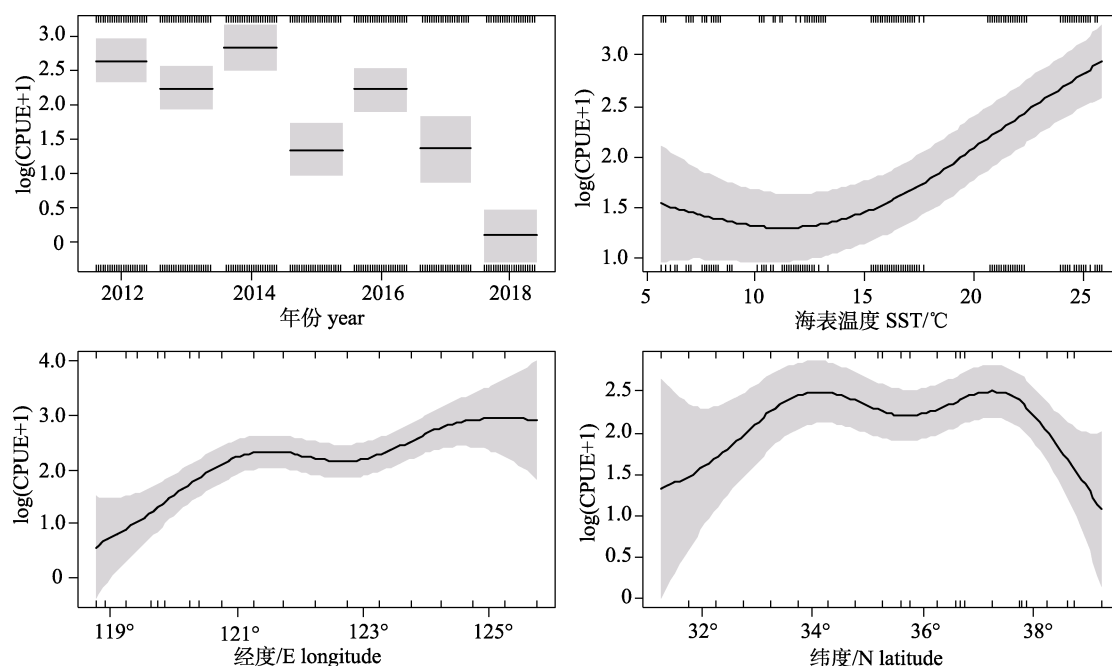


图 5 蓝点马鲛名义 CPUE 与解释变量之间的关系

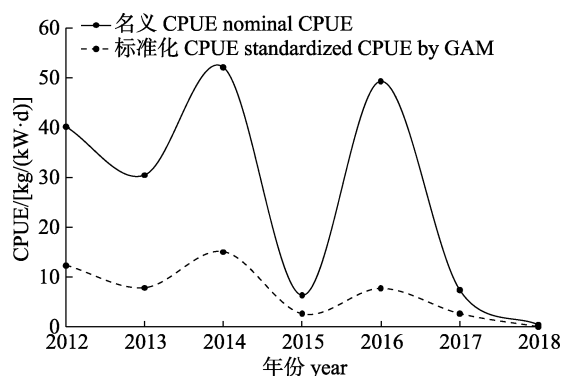
Fig. 5 Effects of explanatory variables on nominal CPUE of *Scomberomorus niphonius*

图 6 蓝点马鲛双船拖网渔业名义 CPUE 和 GAM 模型标准化后 CPUE 的比较

Fig. 6 Comparison between nominal CPUE and standardized CPUE by GAM for *Scomberomorus niphonius* pair trawler fishery

律,符合蓝点马鲛洄游分布特征及其变化,与历史研究相一致^[7-8,36]。蓝点马鲛主要越冬期为 1—2 月,其中一处越冬场位于黄海东南部的外海水域(124°40'E~127°15'E, 32°00'N~33°40'N)^[36],例如,2012 年 1 月、2 月和 2017 年 2 月渔场重心大致与该越冬场水域重叠。每年 3 月,随着近岸水温不断升高,蓝点马鲛鱼群开始陆续游离越冬场进行生殖洄游,4 月下旬其中一部分鱼群进入海州湾渔场、连青石渔场及石岛渔场,5 月开始产卵;9 月随着近岸海水温度不断降低,蓝点马鲛鱼群开

始向南作适温洄游,10 月蓝点马鲛主群开始南移,主要分布于黄海中北部;当进入 11 月后,黄海北部海水温度进一步降低,蓝点马鲛鱼群已经基本全部南移,主要分布于黄海中南部深水海域,到 12 月中、下旬,蓝点马鲛主群经大沙渔场和长江口渔场陆续进入越冬场开始越冬^[7-8,36]。

3.2 各因子与蓝点马鲛名义 CPUE 的关系

GAM 分析表明,表层水温对蓝点马鲛名义 CPUE 具有极显著影响,名义 CPUE 呈现随温度上升而增大的趋势。蓝点马鲛属于中上层洄游性鱼类,对水温的敏感性较强,水温高低与分布影响鱼群进入渔场时间早晚以及在渔场滞留时间长短^[7]。本研究通过比较表层水温变化和渔场重心经纬度变化,进一步了解不同年份水温与渔场分布的关系。在 4 月,蓝点马鲛处于向西向北进行产卵洄游的时期,当海域水温升高时,会促进蓝点马鲛性腺加速发育^[7],因此蓝点马鲛产卵洄游,渔场重心偏西偏北,这与韦晟等^[1,7]研究结果一致。在 9 月和 12 月,因近岸和北部海域水温降低,蓝点马鲛持续向东向南适温洄游,若出现暖冬时水温下降速度减慢,蓝点马鲛越冬洄游速度也随之减慢,渔场重心位置偏西偏北。刘蕊^[9]研究指出,

因厄尔尼诺出现暖冬后蓝点马鲛渔场重心偏北, 本文结果与其结果一致。李琰等^[37]研究表明, 1960—2017年中国近海年平均表层水温呈显著的波动上升趋势, 黄渤海表层水温平均每10年升高0.12℃, 2017年是黄渤海年平均表层水温第二高年份, 仅次于1998年。本文结果中2017年比2012年渔场重心整体偏北, 这可能与2017年平均表层水温高于2012年有关, 万荣等^[38]在黄海蓝点马鲛产卵场分布研究中也发现海表温较高的年份其产卵场分布有向北偏移的趋势。

本研究年份对名义 CPUE 影响最大, 其解释率为 20.8%。由于资源量自身的波动以及海洋环境条件、气候、捕捞努力量等随时间的变化, 最终导致了名义 CPUE 的年间波动^[39]。空间变量经度和纬度也是极显著性变量, 但与时间变量和表层水温相比, 对名义 CPUE 总偏差的解释率较小, 可能与本文的经纬度范围较小有关。

3.3 标准化 CPUE 与名义 CPUE 的比较

本研究标准化 CPUE 与名义 CPUE 值具有相似变化趋势, 但标准化 CPUE 波动幅度明显较小, 名义 CPUE 的年间波动较大且未呈现特定规律, 而标准化 CPUE 在小幅波动中呈现下降趋势, 说明 GAM 模型可以一定程度地排除时空因子和水温对名义 CPUE 的影响^[40], 有助于进一步了解渔业资源实际的变化趋势。由于数据的可获取性, 本研究只考虑时空和部分环境因子的影响, 除自然因素外, 社会经济、管理、渔业发展历史等因素^[41]都对渔业资源时空分布存在一定影响, 今后需获取更全面的数据以开展进一步深入研究。

4 结论

本研究主要分析了黄渤海蓝点马鲛双船拖网渔业 CPUE 的时空分布及其与表层水温的关系, 并应用 GAM 模型对 CPUE 进行标准化。2012—2018 年蓝点马鲛 CPUE 呈现波动中下降趋势, 每年 9—11 月 CPUE 值较高。蓝点马鲛渔场重心的月间变化与其洄游规律一致, 重心经纬度的年间变化与水温变化呈现一定规律, 2012—2018 年水温呈现波动中上升趋势, 蓝点马鲛的渔场重心呈现偏北的变化。GAM 模型标准化后的 CPUE 波动幅度较小, 且其值均小于名义 CPUE。

参考文献:

- [1] Wei S, Zhou B B. Study on short-term fishery forecast of *Scomberomorus niphonius* in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1988, 10(2): 216-221. [韦晟, 周彬彬. 黄渤海蓝点马鲛短期渔情预报的研究[J]. 海洋学报, 1988, 10(2): 216-221.]
- [2] Qiu S Y, Lü Z B, Jiao J J, et al. Study on suitable development and utilization season of fishery resources in Bohai and Yellow Sea[J]. Shandong Fisheries, 2009, 26(3): 18-20. [邱盛尧, 吕振波, 焦金菊, 等. 黄渤海渔业资源适宜开发利用季节的研究[J]. 齐鲁渔业, 2009, 26(3): 18-20.]
- [3] Tian S Q, Chen X J. Impacts of different calculating methods for nominal CPUE on CPUE standardization[J]. 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[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(2): 240-245.]
- [4] Guan W J, Chen X J, Gao F, et al. Comparisons of regression tree and GLM performance in CPUE standardization[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(1): 123-130. [官文江, 陈新军, 高峰, 等. GLM 模型和回归树模型在 CPUE 标准化中的比较分析[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(1): 123-130.]
- [5] Qiu S Y. Dynamics of Japanese Spanish mackerel *Scomberomorus niphonius* (Cuvier et Valenciennes) stocks in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Modern Fisheries Information, 1995, 10(3): 16-19. [邱盛尧. 黄渤海蓝点马鲛 *Scomberomorus niphonius* (Cuvier et Valenciennes) 资源数量变动的研究[J]. 现代渔业信息, 1995, 10(3): 16-19.]
- [6] Sun B X. The current situation and conservation of *Scomberomorus niphonius* in Yellow Sea and Bohai Bay[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009. [孙本晓. 黄渤海蓝点马鲛资源现状及其保护[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.]
- [7] Wei S. The fishing seasons and grounds of the blue spotted mackerel *Scomberomorus niphonius* in the Yellow Sea and Bohai in relation to environmental factors[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1980(2): 34-40. [韦晟. 蓝点马鲛在黄、渤海的渔场、渔期与环境的关系[J]. 海洋湖沼通报, 1980(2): 34-40.]
- [8] Bi S W, Yang X F. Research of fishing ground and fishing time of Spanish mackerel in spring in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1986, 8(5): 657-662. [毕庶万, 杨雪舫. 春汛黄、渤海鲈鱼流网渔场渔期调查研究[J]. 海洋学报, 1986, 8(5): 657-662.]
- [9] Liu R. The monthly and interannual variability in distribution of fishing grounds of the Spanish mackerel *Scomberomorus niphonius* (Cuvier et Valenciennes) in Bohai Sea,

- Yellow Sea and East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. [刘蕊. 渤、黄、东海蓝点马鲛渔场分布的逐月与年间变化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.]
- [10] Yuan Y Y. Fishery oceanography and spatial-temporal distribution variations of *Scomberomorus niphonius* and *Pampus argenteus* in spring in Southern Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. [袁杨洋. 黄海南部春季蓝点马鲛和银鲳渔场海洋学特征与渔场分布[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.]
- [11] Zu K W, Cheng J H, Liu Y, et al. Distribution of fishing grounds of Japanese Spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*) during spawning and overwintering period and its relation with sea surface temperature in China sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2019(6): 48-57. [祖凯伟, 程家骅, 刘阳, 等. 产卵期及越冬期蓝点马鲛渔场分布变化及其与海表温度的关系[J]. 海洋湖沼通报, 2019(6): 48-57.]
- [12] Maunder M N, Langley A D. Integrating the standardization of catch-per-unit-of-effort into stock assessment models: Testing a population dynamics model and using multiple data types[J]. Fisheries Research, 2004, 70(2-3): 389-395.
- [13] Harley S J, Myers R A, Dunn A. Is catch-per-unit-effort proportional to abundance?[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2001, 58(9): 1760-1772.
- [14] Ye Y M, Dennis D. How reliable are the abundance indices derived from commercial catch-effort standardization?[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2009, 66(7): 1169-1178.
- [15] 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.
- [16] Guan W J, Tian S Q, Wang X F, et al. A review of methods and model selection for standardizing CPUE[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(4): 852-862. [官文江, 田思泉, 王学昉, 等. CPUE 标准化方法与模型选择的回顾与展望[J]. 中国水产科学, 2014, 21(4): 852-862.]
- [17] Hastie T J, Tibshirani R J. Generalized Additive Models[M]. London: Chapman and Hall, 1990.
- [18] Su N J, Yeh S Z, Sun C L, et al. Standardizing catch and effort data of the Taiwanese distant-water longline fishery in the western and central Pacific Ocean for bigeye tuna, *Thunnus obesus*[J]. Fisheries Research, 2008, 90(1-3): 235-246.
- [19] Yu H, Jiao Y, Winter A. Catch-rate standardization for yellow perch in Lake Erie: A comparison of the spatial generalized linear model and the generalized additive model[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2011, 140(4): 905-918.
- [20] Li Z G, Ye Z J, Zhang C, et al. Effects of environmental factors on catch distribution of stow net *Pseudosciaena polyactis* and *Lophius litulon* in southern Yellow Sea in spring[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10): 2887-2892. [李增光, 叶振江, 张弛, 等. 环境因子对黄海南部春季帆张网小黄鱼和黄鮟鱇渔获分布的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2887-2892.]
- [21] Song C, Wang Y T, Liu Z L, et al. Relationship between environmental factors and distribution of *Scomberomorus niphonius* eggs, larvae, and juveniles in Xiangshan Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(5): 1197-1204. [宋超, 王宇坛, 刘尊雷, 等. 象山港蓝点马鲛鱼卵、仔稚鱼的时空分布特征及其与环境因子关系[J]. 中国水产科学, 2016, 23(5): 1197-1204.]
- [22] Li Z G, Ye Z J, Wan R, et al. Model selection between traditional and popular methods for standardizing catch rates of target species: A case study of Japanese Spanish mackerel in the gillnet fishery[J]. Fisheries Research, 2015, 161: 312-319.
- [23] Chen C S, Beardsley R C, Cowles G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system[J]. Oceanography, 2006, 19(1): 78-89.
- [24] 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.
- [25] Beverton R J H, Holt S J. On the Dynamics of Exploited Fish Populations[M]. Dordrecht: Springer, 1993.
- [26] Akaike H. A new look at the statistical model identification[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 716-723.
- [27] Scheipl F, Greven S, Küchenhoff H. Size and power of tests for a zero random effect variance or polynomial regression in additive and linear mixed models[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2008, 52(7): 3283-3299.
- [28] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing[M]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2018.
- [29] Bureau of Fisheries of the Ministry of Agriculture. 2014 China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014. [农业部渔业渔政管理局. 2014 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.]
- [30] Bureau of Fisheries of the Ministry of Agriculture. 2015 China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015. [农业部渔业渔政管理局. 2015 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.]
- [31] Bureau of Fisheries of the Ministry of Agriculture. 2016 China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016. [农业部渔业渔政管理局. 2016 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.]
- [32] Bureau of Fisheries of the Ministry of Agriculture. 2017

- China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017. [农业部渔业渔政管理局. 2017 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.]
- [33] Bureau of Fisheries of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2018 China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018. [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2018 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.]
- [34] Bureau of Fisheries of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2019 China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019. [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2019 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.]
- [35] Qiu S Y, Zhang Y K, Song A Q, et al. The fishery status of *Scomberomorus niphonius* in spring fishing seasons and rational utilization in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Marine Fisheries, 1992, 14(2): 61-63. [邱盛尧, 张元奎, 宋爱琴, 等. 黄渤海春汛鲈鱼渔业现状及其资源的合理利用[J]. 海洋渔业, 1992, 14(2): 61-63.]
- [36] Deng J Y, Zhao C Y. Marine Fisheries Biology[M]. Beijing: Agriculture Press, 1991. [邓景耀, 赵传纲. 海洋渔业生物学[M]. 北京: 农业出版社, 1991.]
- [37] Li Y, Fan W J, Luo J X, et al. Climatic characteristics of sea surface temperature and air temperature over the China seas in 2017[J]. Marine Science Bulletin, 2018, 37(3): 296-302. [李琰, 范文静, 骆敬新, 等. 2017 年中国近海海温和气温气候特征分析[J]. 海洋通报, 2018, 37(3): 296-302.]
- [38] Wan R, Song P B, Li Z G, et al. Distribution and environmental characteristics of the spawning grounds of *Scomberomorus niphonius* in the coastal waters of Yellow Sea, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 275-281. [万荣, 宋鹏波, 李增光, 等. 黄海近岸海域蓝点马鲛产卵场分布及其环境特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 275-281.]
- [39] Li G, Chen X J, Tian S Q. CPUE standardization of chub mackerel (*Scomber japonicus*) for Chinese large lighting-purse seine fishery in the East China Sea and Yellow Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(6): 1050-1059. [李纲, 陈新军, 田思泉. 我国东、黄海鲈鱼灯光围网渔业 CPUE 标准化研究[J]. 水产学报, 2009, 33(6): 1050-1059.]
- [40] Xu J, Guan W J, Chen X J. A study of incorporating spatial autocorrelation into CPUE standardization with an application to *Ommastrephes bartramii* in the northwest Pacific Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(5): 754-760. [徐洁, 官文江, 陈新军. 基于空间相关性的西北太平洋柔鱼 CPUE 标准化研究[J]. 水产学报, 2015, 39(5): 754-760.]
- [41] Hinton M G, Nakano H. Standardizing catch and effort statistics using physiological, ecological, or behavioral constraints and environmental data, with an application to blue marlin (*Makaira nigricans*) catch and effort data from Japanese longline fisheries in the Pacific[J]. Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin, 1996, 21: 171-200.

Spatio-temporal distribution and standardization of CPUE for *Scomberomorus niphonius* pair trawler fishery in the Yellow and Bohai Seas

MA Yachen¹, XU Binduo^{1, 2, 3}, ZHANG Chongliang^{1, 2, 3}, YU Huaming⁴, XUE Ying^{1, 2, 3}, REN Yiping^{1, 2, 3}

1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;
2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China;
3. Field Observation and Research Station of Haizhou Bay Fishery Ecosystem, Ministry of Education, Qingdao 266003, China;
4. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: The Spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*) is widely distributed in the China Seas. It is a commercially important marine fish species, which has maintained a high yield in China for many years. With the recent decline in fishery resources, *S. niphonius* has played an increasingly important role in Chinese capture fisheries. Therefore, it is of great significance to analyze the status of fishery resources for the sustainable utilization and rational management of *S. niphonius*. Catch per unit effort (CPUE), commonly used as an index of the relative abundance of fish populations, is one of the most important data sets used for fishery stock assessment. Fishery-dependent monitoring programs are a common source for collecting data for stock assessment and fishery management, as it is more cost-effective and may collect data on a larger spatio-temporal scale compared with that of fishery-independent survey programs. However, the nominal CPUE calculated based on the fishery-dependent survey data is usually influenced greatly by various factors, such as temporal (e.g., year and month), spatial (e.g., longitude and latitude), and environmental (e.g., sea surface temperature) factors. It is essential to standardize the CPUE before it is used in fishery stock assessment. Generalized additive models (GAM) are commonly applied to standardize CPUE data. Based on the logbook data of monitoring fishing vessels in Shandong Province in 2012–2018, the CPUE and variations in the barycenter of fishing grounds for *S. niphonius* pair trawler fishery in the Yellow and Bohai Seas were studied. The GAM model was used to analyze the relationship between the nominal CPUE of *S. niphonius* and the spatio-temporal and environmental factors, such as sea surface temperature, and to standardize the CPUE. The results showed that the nominal CPUE and barycenter of the fishing grounds of *S. niphonius* had clear monthly and annual changes; the nominal CPUE showed a fluctuating downward trend from 2012 to 2018, and the maximum appeared from September to November each year. The monthly changes in the barycenter of the fishing grounds included a spatial shift from the southeast to the northwest and then to the southeast throughout the year, which was consistent with the migration patterns of *S. niphonius*. The barycenter of the fishing grounds showed yearly variation, and the variation in longitude was opposite to the trend of sea surface temperature change, whereas the variation in latitude was the same as the trend of sea surface temperature change. The results of the GAM model showed that year, sea surface temperature, longitude, and latitude had an extremely significant effect on nominal CPUE, among which the year had the most significant effect on nominal CPUE. The nominal CPUE showed an increasing trend with sea surface temperature. The standardized and nominal CPUEs had similar variation trends, but the fluctuation range of the standardized CPUE was small, and its value was lower than that of the nominal CPUE.

Key words: *Scomberomorus niphonius*; spatio-temporal distribution; CPUE standardization; generalized additive model (GAM); Yellow and Bohai Seas

Corresponding author: REN Yiping. E-mail: renyip@ouc.edu.cn