

基于 GAM 模型西北印度洋鳶乌贼 CPUE 标准化*

张弼强¹ 陆化杰^{1, 2, 3, 4} 赵懋林¹ 孙天姿¹ 郭瑞玉¹

(1. 上海海洋大学海洋科学学院 上海 201306; 2. 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室 上海 201306;
3. 国家远洋渔业工程技术研究中心 上海海洋大学 上海 201306; 4. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测
实验站 上海海洋大学 上海 201306)

摘要 单位捕捞努力量渔获量(Catch Per Unit Effort, CPUE)是资源评估的前提和基础,为了更好地评估西北印度洋鳶乌贼资源,采用广义加性模型(generalized additive model, GAM)对 2016~2020 年西北印度洋鳶乌贼的 CPUE 进行了标准化。结果显示,月份、海表温度(sea surface temperature, SST)、海面高度(sea surface height, SSH)、经度和纬度对 CPUE 呈显著性影响,通过对不同 GAM 模型的 AIC (Akaike information criterion)值比较,由月份、SST、SSH、经度和纬度 5 个因子构成的 GAM 模型为最优 CPUE 标准化模型,对 CPUE 偏差的解释率为 40.3%。研究表明,西北印度洋鳶乌贼高 CPUE 主要出现在 9 月至翌年 3 月,海域范围为 16°~19°N、60°~65°E, SST 为 25~28 °C、SSH 为 0.2~0.4 m 的海域内。整体而言,标准化 CPUE 低于名义 CPUE,但二者的变化趋势基本一致。

关键词 西北印度洋; 鳶乌贼; CPUE 标准化; GAM 模型

中图分类号 S932; S937 **doi:** 10.11693/hyh20220400112

鳶乌贼(*Sthenoteuthis oualaniensis*)属枪形目(Teuthoidea)、柔鱼科(Ommastrephidae)、鳶乌贼属(*Sthenoteuthis*),为一种暖水性的大洋性头足类,主要分布于太平洋的赤道、印度洋和亚热带海域(董正之等, 1988; 赵荣兴, 1992; 杨德康, 2002)。鳶乌贼的经济捕捞价值较高,是灯光罩网渔业重要的捕捞对象(陆化杰等, 2014),其中在西北印度洋和我国南海资源量较为丰富(陈新军等, 2005; 范江涛等, 2022)。CPUE 是指单位捕捞努力量渔获量(Catch Per Unit Effort, CPUE),是进行渔业资源评估的重要因子(Hilborn *et al.*, 1992; 何珊等, 2018),广泛应用于渔业资源评估与管理中(Ault, 2000)。在实际应用中,名义 CPUE (未进行标准化的 CPUE)受到捕捞时间、捕捞方式、渔船的参数、时空因子和海洋环境因子等多种因素的影响(Harley *et al.*, 2001; Maunder *et al.*, 2003),难以保证其能够准确反映资源量(Ye *et al.*, 2009)。鉴于此,为了科学利用 CPUE 数据,准

确进行资源评估,去除相关因素的影响,常常需要对名义 CPUE 进行标准化(官文江等, 2014a)。

目前,广义线性模型、广义加性模型、回归树模型、神经网络模型和栖息地模型等都是 CPUE 标准化的常用方法(Venables *et al.*, 2004; 官文江等, 2014b)。广义可加模型(generalized additive model, GAM)作为广义线性模型(generalized linear model, GLM)的拓展,可以利用样条平滑函数增加更多泰勒级数项(即多项式项),使得模型成为非线性模型,从而可以处理响应变量与多个解释变量之间的非线性关系,目前在渔业资源等方面的研究中得到了广泛应用(陆化杰等, 2013a; 徐洁等, 2015)。本研究根据中国罩网渔船于 2016~2020 年西北印度洋鳶乌贼生产数据,利用 GAM 模型对西北印度洋鳶乌贼渔业 CPUE 标准化进行研究,旨在为后续资源评估和渔情预报等提供科学依据。

* 国家重点研发计划项目, 2019YFD090402 号; 国家自然科学基金项目, NSFC 41506184 号。张弼强, 硕士研究生, E-mail: tianzi8888@163.com

通信作者: 陆化杰, 博士, 副教授, 硕士生导师, E-mail: hjlu@shou.edu.cn

收稿日期: 2022-04-27, 收修改稿日期: 2022-07-06

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究中渔业数据来源于 2016~2020 年上海海洋大学鱿钓技术组, 调查范围为 $55^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ}\sim 22^{\circ}\text{N}$ 海域, 渔业数据包括作业渔船名、渔船作业时间、渔船作业经纬度、渔获产量等信息。针对渔业数据进行整体评估、分析, 选取月份为时间分辨率, 按照渔船实际作业区域划分渔区, $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ (即一个渔区) 为空间分辨率。

研究中涉及的环境因子主要包括海表盐度(sea surface salinity, SSS)、海表叶绿素 a 浓度(chl a)、海面高度(sea surface height, SSH)和海表面温度(sea surface temperature, SST), 这些环境因子与鸢乌贼 CPUE 变化密切相关。环境数据来源于 ERDDAP-Home Page (hawaii.edu) 以及 <https://oceansci.gsfc.nasa.gov>, 时间分辨率为月, 空间分辨率 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ 。

1.2 数据处理

由于渔业数据与环境数据的空间分辨率不同, 所以通过数理统计方法对环境数据与渔业数据按渔区进行统计($0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$), 计算每个渔区的月平均值, 对二者的空间分辨率进行转化, 确保渔业数据和环境数据在空间分辨率上的一致。

本文将 CPUE 的定义为每艘船每次作业的捕捞产量, $\text{CPUE}_{y,m,k,l}$ 表示第 y 年、 m 月、 k 经度、 l 纬度(分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$) CPUE 的平均值:

$$\text{CPUE}_{y,m,k,l} = \frac{\sum \text{Catch}_{y,m,k,l}}{\sum E_{y,m,k,l}}, \quad (1)$$

式中, $\sum \text{Catch}_{y,m,k,l}$ 为第 y 年、 m 月、 k 经度、 l 纬度所有渔船的总渔获量(kg), $\sum E_{y,m,k,l}$ 为对应作业区域的总作业天数(单位: d)(田思泉等, 2010)。

海表面温度计算公式如下:

$$\text{SST}_{y,m,k,l} = \frac{\sum_{x=1}^n \text{SST}_{y,m,k,l}}{n}, \quad (2)$$

式中, $\sum \text{SST}_{y,m,k,l}$ 为第 y 年、 m 月、 k 经度、 l 纬度($0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$)内 SST 的平均值, $\sum_{x=1}^n \text{SST}_{y,m,k,l}$ 为第 y 年、 m 月、 k 经度、 l 纬度($0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$)渔区内各个 SST 数据的和(李纲等, 2009)。

海表叶绿素 a 浓度计算公式如下:

$$\text{chl } a_{y,m,k,l} = \frac{\sum_{x=1}^n \text{chl } a_{y,m,k,l}}{n}, \quad (3)$$

式中, $\text{chl } a_{y,m,k,l}$ 为第 y 年、 m 月、 k 经度、 l 纬度($0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$)内 chl a 浓度的平均值; $\sum_{x=1}^n \text{chl } a_{y,m,k,l}$ 为第 y 年、 m 月、 k 经度、 l 纬度($0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$)内各个 chl a 浓度数据的和。

海表面盐度计算公式如下:

$$\text{SSS}_{y,m,k,l} = \frac{\sum_{x=1}^n \text{SSS}_{y,m,k,l}}{n}, \quad (4)$$

式中, $\text{SSS}_{y,m,k,l}$ 为第 y 年、 m 月、 k 经度、 l 纬度渔区($0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$)内 SSS 的平均值, $\sum_{x=1}^n \text{SSS}_{y,m,k,l}$ 为第 y 年、 m 月、 k 经度、 l 纬度渔区($0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$)内各个 SSS 数据的和(官文江等, 2014a)。

海面高度计算公式如下:

$$\text{SSH}_{y,m,k,l} = \frac{\sum_{x=1}^n \text{SSH}_{y,m,k,l}}{n}, \quad (5)$$

式中, $\text{SSH}_{y,m,k,l}$ 为第 y 年、 m 月、 k 经度、 l 纬度($0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$)内 SSH 的平均值, $\sum_{x=1}^n \text{SSH}_{y,m,k,l}$ 为第 y 年、 m 月、 k 经度、 l 纬度($0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$)内各个 SSH 数据的和。

对于处理好的 CPUE 数据以及环境数据, 利用 EXCEL 软件和 R 语言软件按照相同的时空分辨率对二者进行匹配。当环境数据缺失时, 舍弃当天对应区域的生产数据。

1.3 分析方法

在本研究中采用 GAM 模型对印度洋鸢乌贼 CPUE 进行标准化处理, 以 CPUE 作为响应变量, 而月份、作业经度、作业纬度、海表温度、叶绿素 a 浓度、海表盐度、海面高度作为其解释变量建立 GAM 模型, 对所有名义 CPUE 值加上常数“1”后进行对数化处理, 防止 CPUE 为 0 的情况出现(陆化杰等, 2013b), 其表达式为:

$$\ln(\text{CPUE}+1) = s(\text{month})+s(\text{lat})+s(\text{lon})+s(\text{SST})+s(\text{SSH})+s(\text{chl } a)+s(\text{SSS})+\epsilon, \quad (6)$$

式中, s 为自然样条平滑函数, lat 表示纬度, lon 表示经度, month 表示月份, SST 表示海表温度, chl a 表示叶绿素 a 浓度, ϵ 表示随机变量。

对于模型的检验, 则是可以利用赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)检验加入因子后模型的拟合程度, AIC 值越小, 模型的拟合程度越高。

其次, 利用 F 值、 P 值检验因子在模型中的显著与否 (Akaike, 1974; 宋利明等, 2013)。

2 结果

2.1 因子的显著性检验

利用 GAM 模型对各因子进行显著性检验, 结果表明, 月份、经度、纬度、SST、SSH 对 CPUE 的影响显著 ($P < 0.05$), 为显著性变量, SSS 及 chl a 对 CPUE 的影响不显著 ($P > 0.05$)。从表 2 来看, 将经度、纬度、月份、SST 以及 SSH 加入模型后, 模型的偏差解释率得到明显提升, 而当模型中加入 chl a 以及 SSS 时, 模型的偏差解释率并没有显著性增加, 甚至有所降低, 而且其 AIC 值增加, R^2 值减小, 所以将经度、纬度、月份、SST 及 SSH 这 5 个因子保留, 剔除 SSS 和 chl a 这两个因子。最终优化模型为

$$\ln(\text{CPUE}_{+1}) = s(\text{month}) + s(\text{lat}) + s(\text{lon}) + s(\text{SST}) + s(\text{SSH}) + \epsilon. \quad (7)$$

最终优化模型对 CPUE 总偏差解释率为 40.3%, 在构成模型的因子中经度对 CPUE 的影响最大, 其解释偏差率最高为 24.7%, 其次分别为月份 (5.5%)、SST (5.1%)、纬度 (3.7%) 和 SSH (1.3%)。

2.2 空间因子对于 CPUE 的影响

在所有因子中, 经度的方差解释率最高, 为 24.7%。从图 1 中可知, 在 60°E 以西, 随着经度的逐步增加, 西北印度洋海域鸢乌贼 CPUE 呈现出逐步增长的趋势。随后在 $60^\circ\sim 65^\circ\text{E}$, CPUE 变化不明显, 在 65°E 以东, CPUE 又呈现出随经度的增加而降低的趋势。纬度的方差解释率为 3.7%, 从图 2 中可以看到, 在 $10^\circ\sim 14^\circ\text{N}$ 随着纬度向北逐渐增加, CPUE 总体上逐步减少。但在 $14^\circ\sim 16^\circ\text{N}$, 伴随着纬度的增加, CPUE 随之缓慢增加。随后在 $16^\circ\sim 19^\circ\text{N}$ 范围内, CPUE 随着纬度的增加有缓慢减小的趋势。在 19°N 以北范围内,

随着纬度的增大, CPUE 呈增大的趋势。结合图 1 以及图 2 来看, 在经度上, 58°E 以西范围和 66°E 以东范围内的数据量较小, 其置信区间范围较大; 在纬度上, 12°E 以南范围和 20°N 以北范围内的置信区间范围较大, 其可信度相对较低, 鉴于此, 高 CPUE 的空间分布海域范围为 $14^\circ\sim 19^\circ\text{N}$ 、 $60^\circ\sim 65^\circ\text{E}$ 。

2.3 时间因子对于 CPUE 的影响

在所有模型因子中, 月份的方差解释率位居第二, 为 5.5%。从图 3 中可以看出, 1~3 月、5~10 月的范围内, 随着时间的增加, CPUE 呈逐步增长趋势。而在 3~5 月、10~12 月的范围内, 随着时间的增加, CPUE 呈递减趋势。在所有月份中, 10 月份的 CPUE 最高。

2.4 环境因子对 CPUE 的影响

海表温度和海面高度的方差解释率分别为 5.1% 和 1.3%。西北印度洋鸢乌贼作业海域的海表温度范围为 $24.0\sim 30.5^\circ\text{C}$ 。从图 4 可知, 当 SST 在 $24\sim 25^\circ\text{C}$ 之间时, CPUE 随 SST 的增加呈上升趋势, 在 25°C 时 CPUE 最大。而 SST 在 $25\sim 28^\circ\text{C}$ 范围内时, 随着 SST 的增加 CPUE 呈现递减的趋势, 28°C 时 CPUE 最小。SST 在 $28\sim 30.5^\circ\text{C}$ 范围内时, 随着 SST 的增加, CPUE 也逐步增加。在西北印度洋鸢乌贼作业海域, 海面高

表 1 GAM 模型各因子统计结果
Tab.1 Statistics of each factor of the GAM model

因子	F	P
$s(\text{lon})$	12.535	$< 2\text{e-}16^{***}$
$s(\text{lat})$	4.381	$1.45\text{e-}05^{***}$
$s(\text{month})$	6.585	$< 2\text{e-}16^{***}$
$s(\text{SST})$	4.019	$1.64\text{e-}05^{***}$
$s(\text{chl } a)$	0.931	0.346 1
$s(\text{SSS})$	0.487	0.705 7
$s(\text{SSH})$	1.867	0.049 2*

注: ***表示 $P < 0.001$; *表示 $P < 0.05$

表 2 GAM 模型拟合结果的偏差分析
Tab.2 Deviation analysis of the GAM model fitting results

模型公式	AIC	累计解释偏差	决定系数 R^2
$\ln(\text{CPUE}_{+1}) = s(\text{lon})$	2 044.611	24.7%	0.235
$\ln(\text{CPUE}_{+1}) = s(\text{lon}) + s(\text{lat})$	2 020.813	28.4%	0.267
$\ln(\text{CPUE}_{+1}) = s(\text{lon}) + s(\text{lat}) + s(\text{month})$	1 982.103	33.9%	0.317
$\ln(\text{CPUE}_{+1}) = s(\text{lon}) + s(\text{lat}) + s(\text{month}) + s(\text{SST})$	1 955.292	39.0%	0.357
$\ln(\text{CPUE}_{+1}) = s(\text{lon}) + s(\text{lat}) + s(\text{month}) + s(\text{SST}) + s(\text{SSH})$	1 948.895	40.3%	0.367
$\ln(\text{CPUE}_{+1}) = s(\text{lon}) + s(\text{lat}) + s(\text{month}) + s(\text{SST}) + s(\text{SSH}) + s(\text{SSS})$	1 950.587	40.4%	0.366
$\ln(\text{CPUE}_{+1}) = s(\text{lon}) + s(\text{lat}) + s(\text{month}) + s(\text{SST}) + s(\text{SSH}) + s(\text{chl } a)$	1 950.325	40.2%	0.366
$\ln(\text{CPUE}_{+1}) = s(\text{lon}) + s(\text{lat}) + s(\text{month}) + s(\text{SST}) + s(\text{SSH}) + s(\text{chl } a) + s(\text{SSS})$	1 952.15	40.3%	0.365

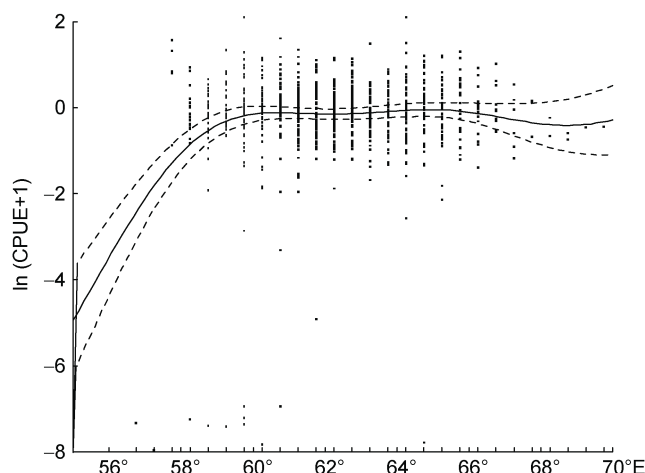


图1 GAM模型中经度对鸢乌贼 CPUE 的影响

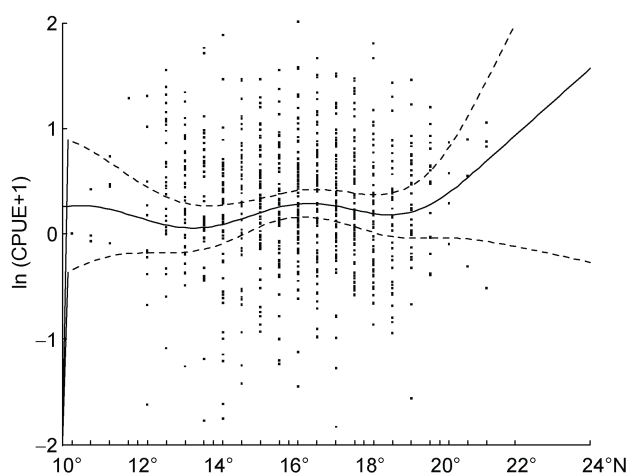
Fig.1 Effect of longitude on CPUE of *S. oualaniensis* in GAM model

图2 GAM模型中经度对鸢乌贼 CPUE 的影响

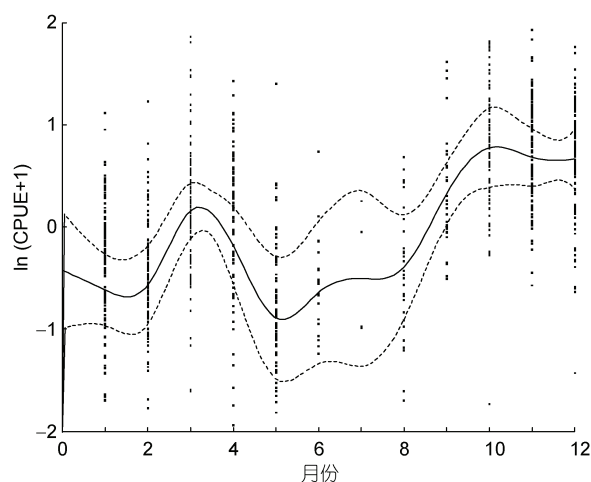
Fig.2 Effect of longitude on CPUE of *S. oualaniensis* in GAM model

图3 GAM模型中月份对鸢乌贼 CPUE 的影响

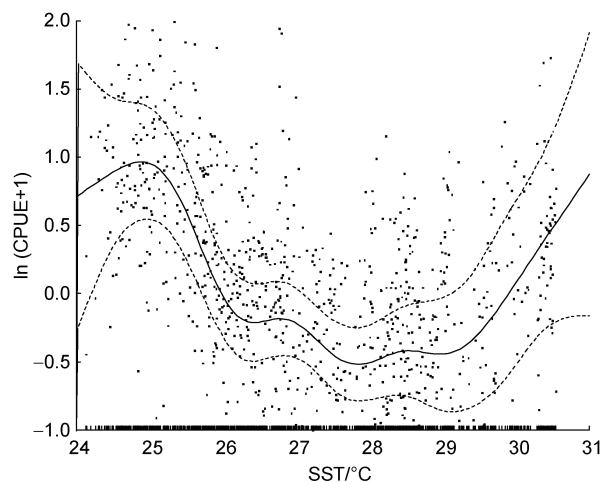
Fig.3 Effect of month on CPUE of *S. oualaniensis* in GAM model

图4 GAM模型中 SST 对鸢乌贼 CPUE 的影响

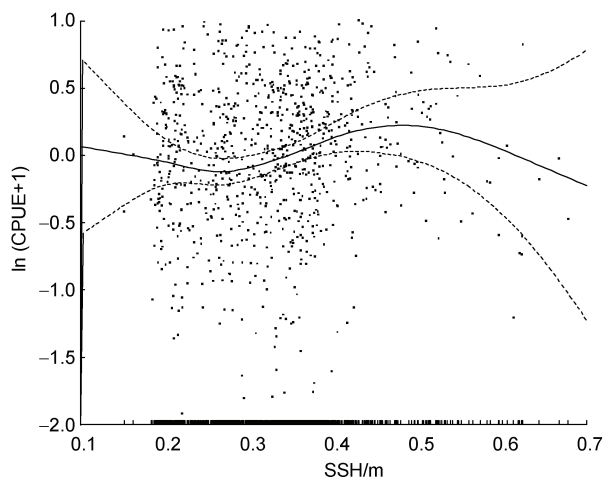
Fig.4 Effect of SST on CPUE of *S. oualaniensis* in GAM model

图5 GAM模型中 SSH 对鸢乌贼 CPUE 的影响

Fig.5 The effect of SSH on CPUE of *S. oualaniensis* in GAM model

度的范围为 0.15~0.67 m。由图 5 可知, 当 SSH 在 0.15~0.30 m 范围内时, CPUE 随着 SSH 的增加而逐步减少。当 SSH 在 0.30~0.67 m 范围时, CPUE 随着 SSH 的增加呈现先增加后减少的趋势, 在 SSH 等于 0.4 m 时, CPUE 上升到顶点。SSH 在 0.5~0.67 m 的范围内, 数据量较为少, 置信区间较大, 所以其可信度相对而言较低。

2.5 名义 CPUE 与标准化 CPUE 的比较

从图 6 可知, 2016~2020 年的 9 月到翌年 3 月期间, 名义 CPUE 与标准化后 CPUE 均维持在较高水平, 2020 年 4~8 月期间, 名义 CPUE 与标准化 CPUE 均呈现下降趋势。从整体上来看, 除部分年间的月份外, 名义 CPUE 均高于标准化 CPUE。尽管在各个月份之间, CPUE 均有一定变化, 但相较而言标准化后 CPUE

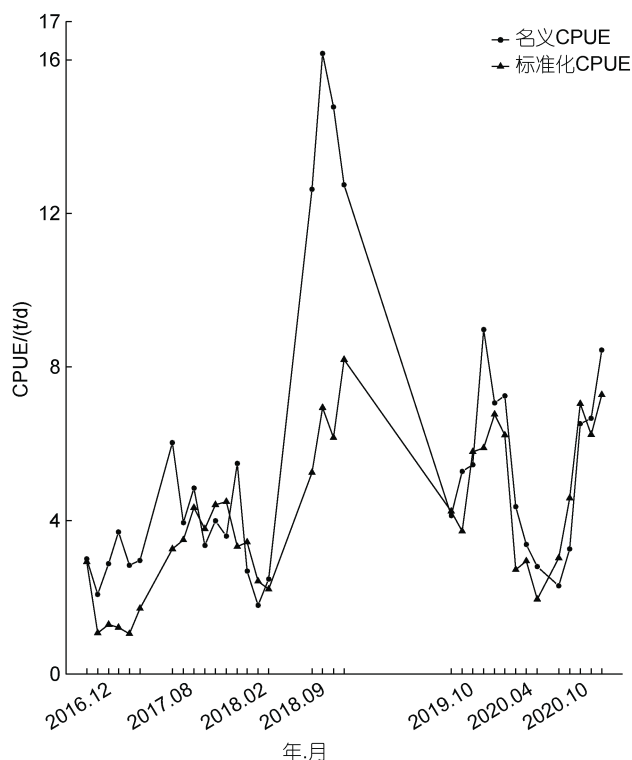


图6 2016~2020年西北印度洋鳶乌贼月平均名义CPUE与标准化CPUE的关系

Fig.6 Relationship between monthly average nominal CPUE and standardized CPUE of *S. oualaniensis* in the northwest Indian Ocean from 2016 to 2020

变化波动较小, 而名义 CPUE 的变化波动较大, 各个月份的名义 CPUE 与标准化后的 CPUE 变化趋势基本一致。

3 讨论

时空因子(经度、纬度等)和环境因子(SST、SSH等)的变化都会影响到西北印度洋鳶乌贼资源的分布(陈新军等, 2005)。在本研究中, GAM 模型由纬度、经度、月份、SST、SSH 这几个因子构成。陆化杰等(2013c)在基于 GAM 模型对西南大西洋的阿根廷滑柔鱼 CPUE 标准化研究中, 对 CPUE 总偏差的解释为 49.20%, 许骆良等(2015)基于 GAM 模型分析了秘鲁外海茎柔鱼的资源丰度变化时对 CPUE 进行标准化, 其方差解释率为 42.3%, 其他学者(陆化杰等, 2013c; 谢恩阁等, 2020)利用 GAM 模型进行 CPUE 标准化的总偏差解释率范围为 30%~70%。本文采用 GAM 模型对 CPUE 进行标准化, 其总偏差解释率为 40.3%, 相对可信度较高。

3.1 时空因子对 CPUE 的影响

本研究结果表明经度、纬度、月份对 CPUE 解释

的总偏差解释率为 33.9%。从空间因子来看, 在经度方面, 伴随着经度的增加, CPUE 整体上呈现出递增趋势, 在纬度方面, 随着纬度的增加, CPUE 的值也不断增大。通过排除可信度较低的部分, 将二者结合显示, 在 $16^{\circ}\sim 19^{\circ}\text{N}$ 、 $60^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{E}$ 的海域, 西北鳶乌贼的 CPUE 相对较大。这与陈新军等(2006)通过分析 CPUE 的空间分布与环境之间的关系, 判断西北印度洋海域鳶乌贼高产渔场的分布范围位于 $16^{\circ}\sim 19^{\circ}\text{N}$ 、 $60^{\circ}\sim 63^{\circ}\text{E}$ 海域的结论基本上一致。从时间因子(月份)的变化情况来看, 上半年鳶乌贼的 CPUE 低于下半年, 其中 CPUE 最低的季度是第 3 季度(7~9 月), CPUE 最高的季度是第 4 季度(10~12 月)。产生这种情况的原因有很多, 其中包括不同季度环境因子的变化等(周天军等, 2004)。CPUE 最高的月份为 10 月份, 最低月份为 7 月份, 除此之外可以看到 9 月~翌年 3 月份西北印度洋海域鳶乌贼的产量以及 CPUE 均维持在较高水平, 本文研究认为 9 月至翌年 3 月为西北印度洋海域鳶乌贼的生产鱼汛。林东明等(2006)认为西北印度洋海域的鳶乌贼生产鱼汛为 9 月至翌年的 4 月, 杨德康(2002)则是根据渔船生产的经验, 认为位于亚丁湾的鳶乌贼渔场其渔汛期为 10 月至翌年的 2 月份。与本文研究结果并不完全相同, 原因主要是渔业生产作业的海域不同, 林东明等(2006)研究针对的海域范围为 $10.5^{\circ}\sim 22.5^{\circ}\text{N}$ 、 $54.5^{\circ}\sim 67.5^{\circ}\text{E}$, 而杨德康(2002)研究的作业海域为近海, 本文研究的海域范围为 $55^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{E}$ 、 $10^{\circ}\sim 22^{\circ}\text{N}$ 。

3.2 环境因子对 CPUE 的影响

在本研究中, 环境因子中海表温度以及海面高度对西北印度洋鳶乌贼 CPUE 呈显著性影响。SST 作为影响鳶乌贼 CPUE 的最大环境因素, 许多学者研究证实了 SST 对于头足类渔场分布有着重要的影响作用(温健等, 2019; 李杰等, 2020)。本研究结果表明, 西北印度洋鳶乌贼的适宜 SST 为 $25\sim 29^{\circ}\text{C}$, 其中主要分布在 SST 为 $25\sim 28^{\circ}\text{C}$ 范围内的海域, 在这个海域内鳶乌贼的产量和 CPUE 均较高。林东明等(2006)调查表明鳶乌贼渔场最适 SST 为 $25\sim 26^{\circ}\text{C}$ 以及 $27\sim 28^{\circ}\text{C}$ 的海域, 余为等(2012)认为鳶乌贼渔场最适 SST 范围 $27\sim 29^{\circ}\text{C}$, 这与本文结论有部分差异, 范江涛等(2015)同样认为不同季节, 鳶乌贼分布的最适 SST 不同, 这可能主要是由于所调查的作业渔场经纬度范围以及作业时间(月份)的不同导致的。

相关学者研究认为, 海面高度与水文特征、营养物质、饵料等息息相关, 对中上层鱼类的生长、繁殖

以及空间分布等存在一定影响(邵锋等, 2008)。在 GAM 模型结果中, SSH 因子对于 CPUE 呈显著性影响, 本次研究得到西北印度洋鸢乌贼渔场的最适 SSH 范围为 0.2~0.4 m, 谢恩阁等(2020)通过对于南海鸢乌贼灯光罩网 CPUE 标准化研究, 分析认为其最适海面高度为 0.60~0.75 m, 余为等(2012)认为的印度洋鸢乌贼渔场适宜的 SSH 为 0.23~0.32 m, 本研究与余为等(2012)的研究结果更加接近, 究其原因还是研究海域的不同引起的, 余为等(2012)研究的海域主要位于 2°~24°N、57°~69°E, 本文研究的海域范围为 55°~70°E、10°~22°N, 也可能还是由于数据的时空尺度以及地理范围上存在差异引起的。

3.3 名义 CPUE 与标准化 CPUE 的比较

本研究表明, 西北印度洋鸢乌贼名义 CPUE 大部分要高于标准化 CPUE, 这一点与其他学者(田思泉等, 2010; 陆化杰等, 2013c)利用 GAM 模型处理 CPUE 标准化的结果基本一致。虽然二者总体上的变化趋势大体相同, 但标准化 CPUE 相较名义 CPUE 变化幅度较小, 名义 CPUE 的变化起伏较大, 即利用 GAM 模型处理后的标准化 CPUE, 在一定程度上能够排除模型中时空因子和环境因子对于名义 CPUE 的影响, 对于之后的资源评估和渔情预报等提供更加准确的科学依据(官文江等, 2014a; 马亚宸等, 2021)。陆化杰等(2013c)利用 GAM 模型对西南大西洋阿根廷滑柔鱼 CPUE 标准化中, 就月平均 CPUE 而言, 名义 CPUE 与标准化 CPUE 变化趋势更加吻合。究其原因, 其 GAM 模型中环境因子以及时空因子更多, 这也是和所研究物种和地域的不同有关。章贤成等(2022)利用 BP 神经网络对西南大西洋阿根廷滑柔鱼资源 CPUE 标准化研究中, 名义 CPUE 与标准化 CPUE 存在一定的差别, 在变化趋势上二者呈现出一致性, 这与模型的选择有很大的关系。

4 结论

本文通过 GAM 模型对影响 CPUE 的相关因子进行筛选, 确认模型中的显著变量, 对 CPUE 进行标准化处理。分析了各个因子与 CPUE 以及渔获量之间的关系, 研究结果认为在 9 月至翌年 3 月, 经纬度为 16°~19°N、60°~65°E, SST 为 25~28 °C、SSH 为 0.2~0.4 m 的海域为高渔获量、高 CPUE 海域。标准化 CPUE 始终低于名义 CPUE, 但二者的分布趋势基本一致。在 GAM 模型的基础上, 针对西北印度洋鸢乌贼的 CPUE 标准化, 相对能够更加准确地反映了西

北印度洋鸢乌贼资源的变化情况, 为后续的资源评估和渔情预报提供了科学依据。

参 考 文 献

- 马亚宸, 徐宾铎, 张崇良, 等, 2021. 黄渤海蓝点马鲛双船拖网渔业 CPUE 时空变化及其标准化[J]. 中国水产科学, 28(4): 493-502.
- 田思泉, 陈新军, 2010. 不同名义 CPUE 算法对 CPUE 标准化的影响[J]. 上海海洋大学学报, 19(2): 240-245.
- 许骆良, 陈新军, 汪金涛, 2015. 2003-2012 年秘鲁外海茎柔鱼资源丰度年间变化分析[J]. 上海海洋大学学报, 24(2): 280-286.
- 李纲, 陈新军, 田思泉, 2009. 我国东、黄海鲈鱼灯光围网渔业 CPUE 标准化研究[J]. 水产学报, 33(6): 1050-1059.
- 李杰, 张鹏, 晏磊, 等, 2020. 南海中南部海域鸢乌贼 CPUE 影响因素的 GAM 分析[J]. 中国水产科学, 27(8): 906-915.
- 杨德康, 2002. 两种鱿鱼资源和其开发利用[J]. 上海水产大学学报, 11(2): 176-179.
- 何珊, 王学昉, 戴黎斌, 等, 2018. 人工集鱼装置禁渔期措施对中国大陆金枪鱼围网船队捕捞努力量特征的影响[J]. 大连海洋大学学报, 33(1): 102-107.
- 余为, 陈新军, 2012. 印度洋西北海域鸢乌贼 9-10 月栖息地适宜指数研究[J]. 广东海洋大学学报, 32(6): 74-80.
- 宋利明, 武亚苹, 2013. 基于 GAM 的吉尔伯特群岛海域黄鳍金枪鱼栖息地综合指数[J]. 水产学报, 37(8): 1250-1261.
- 陆化杰, 王从军, 陈新军, 2014. 4-6 月东太平洋赤道公海鸢乌贼生物学特性初步研究[J]. 上海海洋大学学报, 23(3): 441-447.
- 陆化杰, 陈新军, 方舟, 2013a. 西南大西洋阿根廷滑柔鱼渔场时空变化及其与表温的关系[J]. 海洋渔业, 35(4): 382-388.
- 陆化杰, 陈新军, 曹杰, 2013b. 基于 GLBM 模型的中国大陆阿根廷滑柔鱼鱿鱼渔业 CPUE 标准化[J]. 生态学报, 33(17): 5375-5384.
- 陆化杰, 陈新军, 曹杰, 等, 2013c. 中国大陆阿根廷滑柔鱼鱿鱼渔业 CPUE 标准化[J]. 水产学报, 37(6): 951-960.
- 陈新军, 叶旭昌, 2005. 印度洋西北部海域鸢乌贼渔场与海洋环境因子关系的初步分析[J]. 上海水产大学学报, 14(1): 55-60.
- 陈新军, 邵锋, 2006. 印度洋西北部公海鸢乌贼资源特征及其与海况的关系[J]. 中国海洋大学学报, 36(4): 611-616.
- 邵锋, 陈新军, 2008. 印度洋西北海域鸢乌贼渔场分布与海面高度的关系[J]. 海洋科学, 32(11): 88-92.
- 范江涛, 余为, 马胜伟, 等, 2022. 春季南海鸢乌贼栖息地时空分布及其年际差异分析[J]. 南方水产科学, 18(1): 1-9.
- 范江涛, 张俊, 冯雪, 等, 2015. 基于栖息地模型的南沙海域鸢乌贼渔情预报研究[J]. 南方水产科学, 11(5): 20-26.
- 林东明, 陈新军, 2006. 印度洋西北部海域鸢乌贼渔场分布及其与海面温度的关系[J]. 海洋科学进展, 24(4): 546-551.
- 周天军, 俞永强, 宇如聪, 等, 2004. 印度洋对 ENSO 事件的响应: 观测与模拟[J]. 大气科学, 28(3): 357-373.
- 官文江, 田思泉, 王学昉, 等, 2014a. CPUE 标准化方法与模型选择的回顾与展望[J]. 中国水产科学, 21(4): 852-862.
- 官文江, 陈新军, 高峰, 等, 2014b. 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, 23(1): 123-130.

- 赵荣兴, 1992. 印度洋可开发的外洋性头足类[J]. 现代渔业信息, 7(8): 25-26.
- 徐洁, 官文江, 陈新军, 2015. 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, 39(5): 754-760.
- 章贤成, 汪金涛, 陈新军, 2022. 基于 BP 神经网络的阿根廷滑柔鱼资源 CPUE 标准化研究[J]. 渔业科学进展, 43(2): 11-20.
- 董正之, 郑元甲, 朱善央, 1988. 东海南部的头足类稚仔[J]. 水产学报, 12(1): 51-55.
- 温健, 陆鑫一, 陈新军, 等, 2019. 基于海表温度和光合有效辐射的西北太平洋柔鱼冬春生群体栖息地热点预测[J]. 上海海洋大学学报, 28(3): 456-463.
- 谢恩阁, 周艳波, 冯菲, 等, 2020. 中国南海海外海鸢乌贼灯光罩网渔业 CPUE 标准化研究[J]. 大连海洋大学学报, 35(3): 439-446.
- AKAIKE H T, 1974. A new look at the statistical model identification [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 19(6): 716-723.
- AULT J S, 2000. Quantitative fish dynamics. Terrance J. Quinn II, Richard B. Deriso [J]. Quarterly Review of Biology, 75(3): 336.
- HARLEY S J, MYERS R A, DUNN A, 2001. Is catch-per-unit-effort proportional to abundance? [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 58(9): 1760-1772.
- HILBORN R, WALTERS C J, 1992. Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics and uncertainty [J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2(2): 177-178.
- MAUNDER M N, STARR P J, 2003. Fitting fisheries models to standardised CPUE abundance indices [J]. Fisheries Research, 63(1): 43-50.
- VENABLES W N, DICHMONT C M, 2004. GLMs, GAMs and GLMMs: an overview of theory for applications in fisheries research [J]. Fisheries Research, 70(2/3): 319-337.
- YE Y M, DENNIS D, 2009. How reliable are the abundance indices derived from commercial catch-effort standardization? [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 66(7): 1169-1178.

STANDARDIZATION OF CATCH PER UNIT EFFORT (CPUE) IN NORTHWEST INDIAN OCEAN *STHENOTEUTHIS OUALANIENSIS* BASED ON GENERALIZED ADDITIVE MODEL

ZHANG Bi-Qiang¹, LU Hua-Jie^{1, 2, 3, 4}, ZHAO Mao-Lin¹, SUN Tian-Zi¹, GUO Rui-Yu¹

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Marine Ecological Monitoring and Restoration Technologies, MNR, Shanghai 201306, China; 3. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract Catch per unit effort (CPUE) is the premise and basis of resource assessment. To better assess the resources of purpleback flying squid *Sthenoteuthis oualaniensis* in the northwest Indian Ocean, we used the generalized additive model (GAM) to standardize the CPUE of *S. oualaniensis* in the northwest Indian Ocean from 2016 to 2020. The results showed that month, sea surface temperature (SST), sea surface height (SSH), longitude, and latitude have significant effects on the CPUE. Comparison of AIC (Akaike information criterion) values of different GAM models established the best CPUE evaluation model in which five factors of month, SST, SSH, longitude, and latitude are used, and the interpretation rate of CPUE deviation is 40.3%. The research showed that the high CPUE of *S. oualaniensis* in the northwest Indian Ocean occurs mainly from September to next March in the sea area covering from 16°N to 19°N, 60°E to 65°E, SST from 25 °C to 28 °C, and SSH from 0.2 m to 0.4 m. On the whole, the standardized CPUE is lower than the nominal CPUE, but their change trends are largely the same.

Key words northwest Indian Ocean; *Sthenoteuthis oualaniensis*; CPUE standardization; GAM model