

文章编号: 1674-5566(2025)02-0422-12

DOI: 10.12024/jsou.20241104705

基于sdmTMB的大西洋剑鱼延绳钓渔业CPUE标准化

万发如意¹, 林泓羽¹, 张帆^{1,2}

(1. 上海海洋大学 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 2. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306)

摘要: 为了提高评估结果的可靠性并支持可持续管理, 在进行种群资源评估前, 评估单位捕捞努力量渔获量 (Catch per unit effort, CPUE) 标准化方法的稳健性是必要的。渔业资源评估需要长期且连续的工作, 其精确性对于管理决策和物种保护至关重要。基于 1995—2022 年间大西洋西班牙延绳钓船队的数据进行分析, 利用 sdmTMB 方法对大西洋剑鱼 (*Xiphias gladius*) 渔业的 CPUE 进行标准化, 同时利用 Mohn's ρ 方法进行回溯性分析, 验证 13 个不同时间序列数据 (A~M) 的稳健性。结果显示, 不同时间序列的标准化 CPUE 的结果差异较小, 回溯性分析进一步确认了其一致性。研究表明, sdmTMB 方法对大西洋剑鱼进行 CPUE 标准化具有较高的稳健性, 能够准确反映该种群的相对资源丰度。本研究可为可靠的资源评估及科学的渔业管理决策提供有力的支持。

关键词: 大西洋剑鱼; CPUE 标准化; 稳健性; sdmTMB

中图分类号: S 932

文献标志码: A

剑鱼 (*Xiphias gladius*) 是一种大型且高度洄游的掠食性鱼类^[1], 是全球重要的经济鱼类, 其经济价值与大眼金枪鱼 (*Thunnus obesus*) 相当^[2]。近年来, 随着金枪鱼渔业的迅速扩张, 大西洋剑鱼的资源状况呈现出不容乐观的趋势, 南部种群处于过度捕捞状态, 北部种群面临过度捕捞的风险^[3]。为应对这一问题, 养护大西洋金枪鱼国际委员会 (The International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna, ICCAT)^[4] 针对大西洋剑鱼制定了一系列严苛的管理措施^[3]。

资源评估是为区域渔业管理组织 (Regional fisheries management organization, RFMO) 监测资源状况并制定科学管理措施的重要工具。ICCAT 定期召开剑鱼资源评估会议, 近年主要采用贝叶斯状态空间剩余产量模型 (Just Another Bayesian Biomass Assessment, JABBA)^[5-6] 和种群综合模型 (Stock synthesis, SS)^[7-8] 来评估大西洋剑鱼资源状况, 为管理措施的制定提供依据。在这些评估模型中, 相对丰度指数是最重要的输

入数据之一。作为物种实际丰度的重要指标, 相对丰度指数通常包括声学调查数据^[9] 和商业渔船的单位捕捞努力量渔获量 (Catch per unit effort, CPUE)^[10]。由于剑鱼的高度洄游属性和声学调查的高成本^[11], 大西洋剑鱼的资源评估主要依赖于 CPUE 标准化所得出的相对丰度指数。

CPUE 定义为特定时间段 (如年或月) 内某渔场的总渔获量与总捕捞努力量之比^[12]。CPUE 通常并非与种群丰度成正比^[13], 而是受到捕捞力度的变化、鱼群数量、迁徙模式、环境和气候因素及捕捞策略变化等多方面因素的影响^[14], 呈现非线性关系。因此, CPUE 标准化旨在消除这些因素的影响, 从而提高资源评估结果的准确性。随着空间统计学、计算方法和渔业管理的快速发展, 时空模型在 CPUE 标准化中的应用日益广泛^[15]。通过使用时空模型进行标准化, 可以更准确地预测数据稀缺或缺失区域的资源状况, 填补数据不足的空间单元并增强小样本单元的统计稳健性; 此外, 时空模型能够有效减小因采样设计变化而

收稿日期: 2024-11-22 修回日期: 2025-01-13

基金项目: 国家自然科学基金 (32373132)

作者简介: 万发如意 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源评估。E-mail: 13608591426@163.com

通信作者: 张帆, E-mail: f-zhang@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部 (CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydxxb.com>

产生的空间偏差^[16]。

对区域渔业组织而言,每个大洋性鱼种的资源评估都需要长期且连续的工作,通过系统性地审视物种过去几十年的状态,为未来的资源管理提供科学依据。然而,在实际的渔业研究中,时间序列的选择存在着显著差异,这种差异直接致使 CPUE 标准化结果在同一特定年份也可能呈现出不一致的情况。具体而言,数据起始与终止年份的差异会使得纳入分析的样本信息出现偏差。例如,选择较长时间序列可能涵盖了更多不同渔业发展阶段的信息,包括早期捕捞技术的进步、中期渔业快速发展以及后期可能的资源衰退或管理措施实施后的变化等阶段。当使用不同时间间隔的数据进行 CPUE 标准化时,即使是相同年份,模型所依据的信息基础不同,也会得出不同的标准化结果。

因此,利用回溯性分析来评估 CPUE 标准化结果的稳健性尤为重要,以确保其在资源评估中的可靠性。大多研究在进行 CPUE 标准化时,通常未验证结果的准确性和稳健性,而这些恰恰是确保资源评估结果科学性和可信度的重要环节。本研究聚焦于大西洋剑鱼延绳钓渔业,通过 sdmTMB 方法对 CPUE 进行了标准化处理,并对 1995—2022 年间不同时间序列的 CPUE 标准化数据进行了回溯性分析,旨在评估 sdmTMB 方法在 CPUE 标准化过程中的稳健性,以更精确地估计渔业资源的真实丰度,为可靠的资源评估及科学的渔业管理决策提供有力的支持,从而提高评估的可靠性及管理的可持续性。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 渔业数据

本研究使用的数据源自 ICCAT 官方网站提供的公共领域数据集^[17]。此数据集涵盖了 1950—2022 年大西洋作业渔船的捕捞努力量、渔获量及其作业位置的经纬度,时间分辨率为月,空间分辨率为 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 。根据大西洋剑鱼的渔获量分布,大西洋剑鱼最主要的捕捞方式为延绳钓,90% 以上通过延绳钓捕获,此外,西班牙是大西洋剑鱼捕捞量最高的国家,每年产量接近 1 万 t^[18],1995—2022 年大西洋西班牙延绳钓渔业产量占比达 35%。因此,本研究聚焦了 1995—2022 年西班牙

的延绳钓数据,作为后续分析的基础。由于大西洋剑鱼在地中海以及西北大西洋的热带水域和南大西洋产卵场不同^[19-20],南北种群遗传结构^[21]和洄游习性^[22]存在显著差异,根据 ICCAT 的地理划分标准,研究区域以 5°N 为分界,划分为大西洋北部和南部种群^[22](图 1)。

1.1.2 环境数据

环境因素对渔业资源的分布具有重要影响^[23],并且环境主导的栖息地适宜性与种群密度之间可能存在密切关联^[24]。环境条件如温度、盐度等会影响中上层鱼类的可捕获性^[14]。剑鱼在大西洋北部和南部的温带水域之间大规模迁徙^[25],从海水表面到 550 m 深处都能发现其存在^[26]。因此,本研究纳入了一系列大西洋环境变量(表 1),这些变量的数据采集时间跨度均为 1995—2022 年,且所有数据均源于哥白尼海洋环境观测服务中心(The Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS)官方网站(<https://marine.copernicus.eu/>),其具备 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的空间分辨率以及月度的时间分辨率。利用 R 软件中的“Raster”包^[27]将渔业数据与环境数据的时空分辨率进行匹配。

1.2 分析方法

1.2.1 变量筛选

数据分析方法对于分析日益增长的海量高维数据至关重要。一方面,聚类分析试图通过将数据点划分为不重叠的组,使属于同一聚类的数据点相似,而属于不同聚类的数据点不相似,从而快速挖掘出数据信息^[28],当下 K-means 方法是最流行、最有效的聚类方法之一^[29-30]。另一方面,高维数据通常通过主成分分析(Principal component analysis, PCA)转换为低维数据,可以更清楚地检测到相关性^[31]。PCA 现已广泛应用于渔业科学中^[32],PCA 可用于分析不同物种在不同栖息地的分布模式^[33],基于 PCA 降维技术,能够将环境数据转变成少数几个不相关但保留重要信息的主成分(Principal components, PCs)^[34]。

基于范秀梅等^[34]的研究方法,首先对南北部大西洋的环境数据进行了 PCA 分析,并提取前两个主成分进行 K-means 聚类,将环境变量分为不相关的几个聚类簇,在每一簇中选取前两个主成分最大的环境数据,以此筛选出不相关但是保留了主要信息的少数几个环境数据。

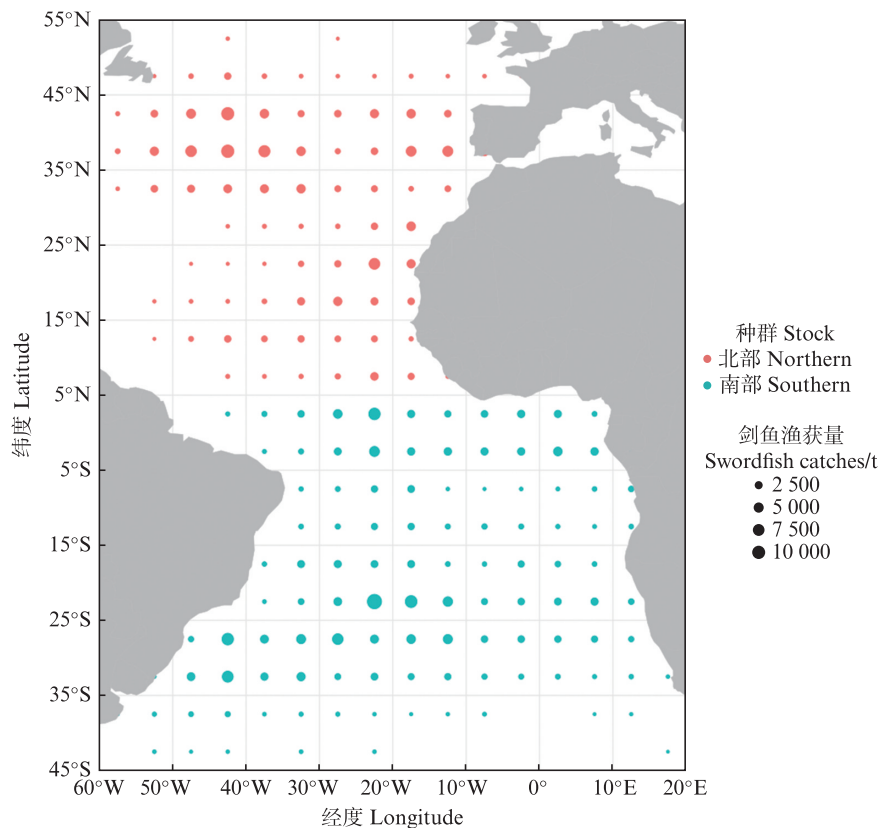


图1 1995—2022年大西洋剑鱼北部、南部种群的西班牙延绳钓捕捞分布图

Fig. 1 Distribution of the Spanish longline fishery for the northern and southern stocks of Atlantic swordfish, 1995—2022

表1 本研究采用的大西洋海洋环境数据信息(1995—2022年)

Tab. 1 Environmental data included in this study (1995—2022)

环境变量 Environmental variables	代表符号 Representative symbol	范围 Scope
混合层厚度 Mixed layer depth/m	mld	10.77~318.53
海表面高度 Sea surface height/m	ssh	-0.84~0.36
海表面温度 Sea surface temperature/°C	sst ₀	0.15~29.53
海表面盐度 Sea surface salinity	sss ₀	31.35~37.64
海表面溶解氧浓度 Sea surface dissolved oxygen concentration/(mmol/m ³)	do ₀	199.20~346.45
海表面生物净初级生产量 Sea surface net primary production/[mg/(m ³ ·d)]	npp ₀	0.14~113.47
50 m深度海水温度 Temperature of sea water at 50 metres depth/°C	sst ₅₀	0.38~28.13
50 m深度海水盐度 Salinity of sea water at 50 metres depth	sss ₅₀	32.25~37.50
50 m深度海水溶解氧浓度 Dissolved oxygen concentration in seawater at 50 metres depth/(mmol/m ³)	do ₅₀	40.21~35.08
50 m深度海水生物净初级生产量 Biological net primary production in seawater at 50 metres depth/[mg/(m ³ ·d)]	npp ₅₀	0.07~33.06
100 m深度海水温度 Temperature of sea water at 100 metres depth/°C	sst ₁₀₀	-0.64~25.64
100 m深度海水盐度 Salinity of sea water at 100 metres depth	sss ₁₀₀	32.89~37.47
100 m深度海水溶解氧浓度 Dissolved oxygen concentration in seawater at 100 metres depth/(mmol/m ³)	do ₁₀₀	14.32~327.10
100 m深度海水生物净初级生产量 Biological net primary production in seawater at 100 metres depth/[mg/(m ³ ·d)]	npp ₁₀₀	0.001~8.30

1.2.2 CPUE 标准化的模型构建

ANDERSON 等^[35]开发的“sdmTMB”R 软件包,可以用来构建时空广义加性模型(Spatio-temporal generalised additivity model, ST-GAM),

在渔业科学研究中已被广泛应用。相较于传统的 GAM 模型,ST-GAM 模型不仅提高了拟合的精度,并且增强了对于没有数据或者数据很少的空间区域的外推预测能力^[36]。sdmTMB 依靠随

机偏微分方程 (Stochastic partial differential equation, SPDE) 方法,结合 R-INLA 中的集成嵌套拉普拉斯逼近法来逼近高斯随机场 (Gaussian random field, GRF),以降低计算成本^[37]。CORREA 等^[37]使用 sdmTMB 来实现大西洋黄鳍金枪鱼 (*Thunnus albacares*) 围网渔业的 CPUE 标准化;HEBERT 等^[38]利用 sdmTMB 模型预测了苏格兰架海参 (*Cucumaria frondosa*) 的相对丰度,同时对某些区域丰度随时间的演变提供了略有不同的观点。

本研究采用 sdmTMB 对 1995—2022 年大西洋剑鱼西班牙船队的延绳钓数据进行 CPUE 标准化,解释变量包括年份、月份及上述环境变量,模型空间自相关网格的最小长度设置为 500 km,时间自相关按季度分层。

名义 CPUE 的计算公式如下:

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

式中: C 为渔获物的质量, kg; E 为捕捞努力量, 千钩; C_{CPUE} 为单位捕捞努力量渔获量 CPUE, kg/千钩。

1.2.3 相对丰度指数的拟合

为了通过最终模型对研究区域 1995—2022 年的 CPUE 指数进行拟合,构建了大西洋区域 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 的空间网格。每个单元格由与其中心相对应的地理坐标标识;环境变量也通过哥白尼海事服务中心获得。此外,根据空间域对每个船队或年份组合复制网格。然后,所有拟合均由网格进行,同时对季节或年份内 CPUE 的差异进行建模。通过训练后的 ST-GAM 获得每个网格/船队/年份组合的生物量和密度指数预测值,根据每次调查的空间域进行平均,以得到新的标准化指数,最后将新的标准化指数与观察到的平均 CPUE 进行比较^[39]。

1.2.4 稳健性分析

为精准验证不同时间序列长度下 CPUE 标准化模型输出结果的准确性与稳健性,本研究将多种不同时间跨度的数据输入至 sdmTMB 模型 (表 2),并借助回溯性分析手段对模型的稳健性进行全面评估。回溯性分析本质上是对渔业变量的连续估计展开深入探究,其具体操作是在既有数据集中逐步添加额外年份的数据,从而构建出不同的数据窗口。当某一特定年份的估计数值呈现出明显的不一致现象,且这种不

一致并非随机无序的分散状态,而是呈现出系统性的偏差模式时,便表明存在回溯性问题^[40]。在回溯性分析中,常用 Mohn's ρ ^[40] 衡量基于模型估计的相对误差,以评估方法在一系列评估中的一致性^[41]。Mohn's ρ 能够精准衡量缩减时间序列评估的估计数量与完整时间序列估计的相同数量之间的相对差异,其定义为回溯估计值的平均相对偏差。具体计算步骤:首先求出相对偏差,随后对这些相对偏差求平均值,最终得到 ρ 值。通过对不同年份或者不同数据窗口下的 ρ 值进行精确计算,可以全面且深入地评估渔业变量估计的稳健性与可靠性^[40]。

本研究依据各时间序列长度 (表 2) 的标准化 CPUE 结果,运用 Mohn's ρ 方法开展回溯性分析,旨在对模型输出结果的一致性和稳健性进行科学评估, ρ 值的计算公式:

$$\rho = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \left(\frac{I_{y-i}^R - I_{y-i}}{I_{y-i}} \right) \quad (2)$$

式中: I_{y-i} 为使用完整数据对年份 $y-i$ 估计值的标准化值; I_{y-i}^R 为使用截至年份 $y-i$ 数据的估计值; c 为移除年份的最大数量,这里假定为 1^[42]。

通常而言, ρ 值越接近于 0,则意味着模型越具有更为良好的一致性^[43]。在本次研究中, Mohn's ρ 作为衡量模型稳健性的关键指标,一般情况下,以 -0.15 作为下限, 0.20 作为上限,以此来确定物种的可接受性能范围^[41]。当计算得出的 ρ 值处于这一区间内时,便可认定模型在回溯性分析中展现出较为出色的稳健性,对于渔业资源的长期评估而言,具有一定程度的可靠性,能够为渔业资源的科学管理与合理开发提供有力的数据支撑和理论依据。

2 结果与分析

2.1 变量筛选与模型构建

本研究变量包括不同深度的 sst、sss、do 以及 npp,此外还包括 mld 和 ssh。通过 K-means 聚类分析与 PCA 的结合,结果显示北部和南部种群的所有环境变量均被划分为 4 类,图 2 中 4 种颜色分别代表不同类别。在 PCA 分析中,箭头长度越长表明其重要性越强^[44],每个类别中重要性最强的变量则分别为我们筛选出的变量。其中,北部种群筛选

出的变量为 sst_{50} , npp_{50} , sss_{100} 及 do_0 ; 南部种群筛选出的变量为 sst_0 , npp_{50} , sss_{100} 及 do_0 (图2)。

表2 1995—2022年大西洋北部及南部种群不同时间序列对应的组别

Tab. 2 Groups corresponding to different time series of northern and southern Atlantic stocks, 1995—2022

时间序列 Time series	对应组别 Corresponding groups	时间序列 Time series	对应组别 Corresponding groups
1995—2022	A	1995—2015	H
1995—2021	B	1995—2014	I
1995—2020	C	1995—2013	J
1995—2019	D	1995—2012	K
1995—2018	E	1995—2011	L
1995—2017	F	1995—2010	M
1995—2016	G		

基于变量筛选的结果构建的 sdmTMB 模型

公式如下, 其中公式(3)适用于北部种群, 公式(4)适用于南部种群:

$$C_{CPUE} = \text{factor}(X_{\text{year}}) + \text{factor}(X_{\text{month}}) + s(X_{sst_{50}}) + s(X_{npp_{50}}) + s(X_{sss_{100}}) + s(X_{do_0}) + \varepsilon \quad (3)$$

$$C_{CPUE} = \text{factor}(X_{\text{year}}) + \text{factor}(X_{\text{month}}) + s(X_{sst_0}) + s(X_{npp_{50}}) + s(X_{sss_{100}}) + s(X_{do_0}) + \varepsilon \quad (4)$$

式中: factor 为分类变量函数; s 为连续变量的自然立方样条平滑函数 (Natural cube spline smoother); X_{year} 为年效应; X_{month} 为月效应; $X_{sst_{50}}$ 为 50 m 深度海水温度效应; $X_{npp_{50}}$ 为 50 m 深度海水生物净初级生产量效应; $X_{sss_{100}}$ 为 100 m 深度海水盐度效应; X_{do_0} 为海表面溶解氧浓度效应; X_{sst_0} 为海表面温度效应。

对训练好的模型进行残差诊断, 2 个模型的残差均为正态分布 (图3)。

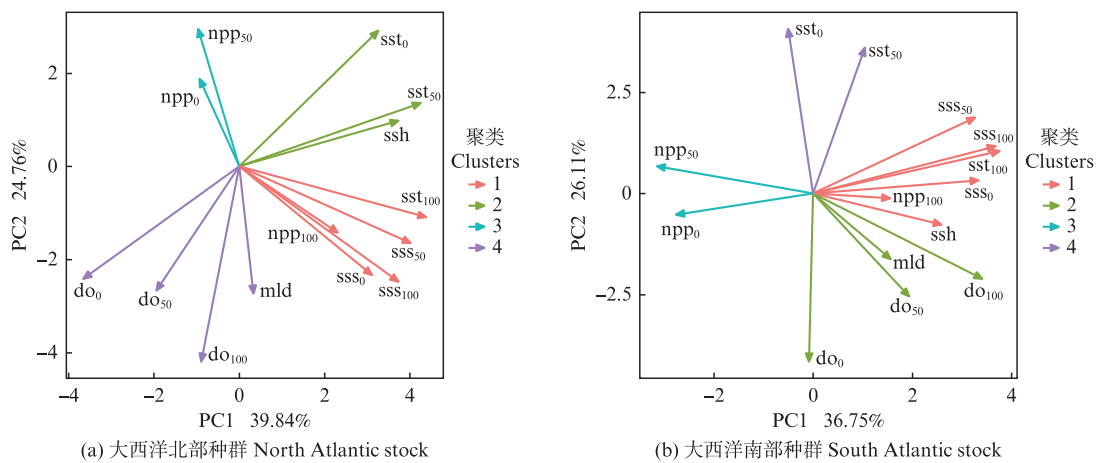


图2 K-means聚类及PCA结果
Fig. 2 K-means clustering and PCA results

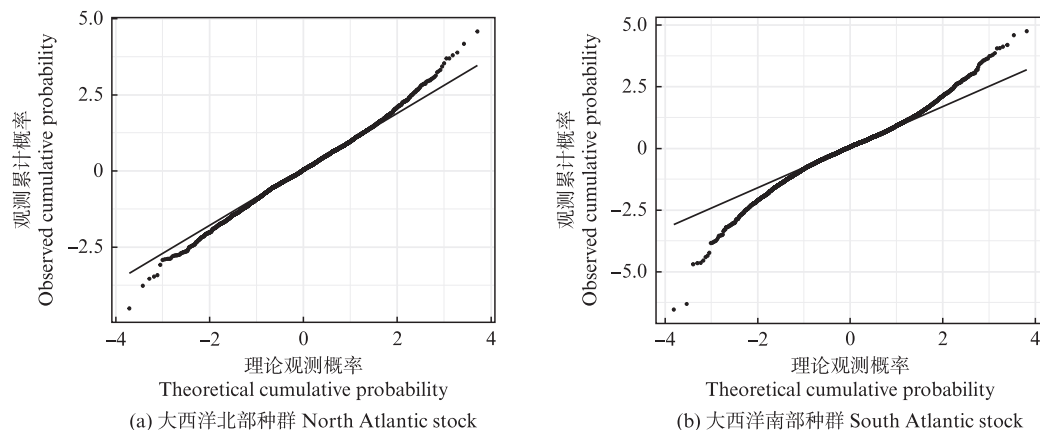
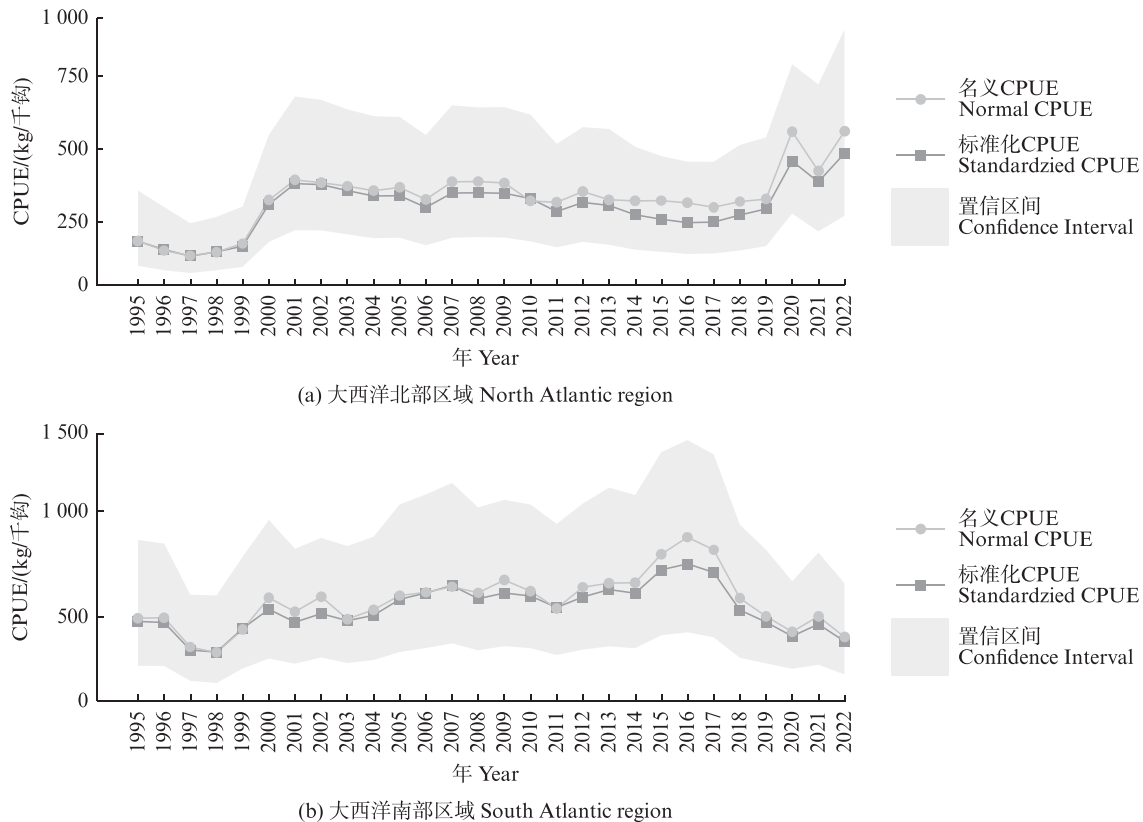


图3 Q-Q图
Fig. 3 Quantile-Quantile plot

2.2 名义 CPUE 与标准化 CPUE 比较

本研究利用 sdmTMB 模型对年平均 CPUE 进行了拟合(图4)。北部(图4a)及南部(图4b)种群的标准化 CPUE 与名义 CPUE 比较显示,两者的变化趋势均是相似的,但标准化 CPUE 的波动

幅度相对较小。北部种群的名义 CPUE 和标准化 CPUE 均在 2022 年达到峰值,1997 年处于最低值。对于南部种群,其名义 CPUE 和标准化 CPUE 均在 2016 年达到最高值,1998 年处于最低值。



灰色区域表示 95% 的置信区间。

Grey areas indicate 95% confidence intervals.

图 4 1995—2022 年大西洋剑鱼延绳钓渔业名义 CPUE 与标准化 CPUE 的比较

Fig. 4 Nominal CPUE versus standardized CPUE in the Atlantic swordfish longline fishery, 1995–2022

2.3 稳健性分析

在 1995—2022 年间,通过 sdmTMB 方法计算的大西洋剑鱼北部及南部种群各时间序列(A~M 组)的标准化 CPUE 的结果显示出一致的变化趋势(图 5)。对于北部种群,各时间序列的标准化 CPUE 值在大多数年份中几乎一致(图 5)。通过 Mohn's ρ 的方法进行回溯性分析,结果显示 Rho 值为 -0.017 3,表明模型输出具有良好的一致性。

1995—2022 年间,南部种群各时间序列的标准化 CPUE 同样表现出一致的变化趋势(图 6)。相同年份内不同时间序列的 CPUE 值差异较小,部分时间的变化趋势几乎重合。通过 Mohn's ρ 的方法进行回溯性分析,结果显示 Rho 值为 0.007 4,进一步支持模型输出的稳健性。

3 讨论

3.1 变量筛选与模型构建

通过 PCA 和 K-means 聚类方法的结合,我们能够有效地筛选出最重要的环境变量,并利用这些变量进行 CPUE 标准化。有研究^[45]表明,将关键环境因素整合到 CPUE 标准化模型中,可以显著降低估算误差,增强模型的稳健性。

PCA 结果显示,同一环境变量在不同深度下的表现可能存在显著差异,从而相关性较弱^[46]。例如,大西洋北部和南部区域的 npp_{100} 与 npp_0 和 npp_{50} 呈负相关,这表明深层水中的生物净初级生产量与表层和中层水体的净初级生产量存在显著差异。同样, sst_{100} 与 sst_{50} 和 sst_0 的相关性较弱,

这意味着深层水温与表层和中层水温之间的关系并不紧密。出现这种现象,可能是由于不同深

度的水体受不同的物理和生物过程影响,进而致使环境变量在不同深度呈现出差异表现^[47]。

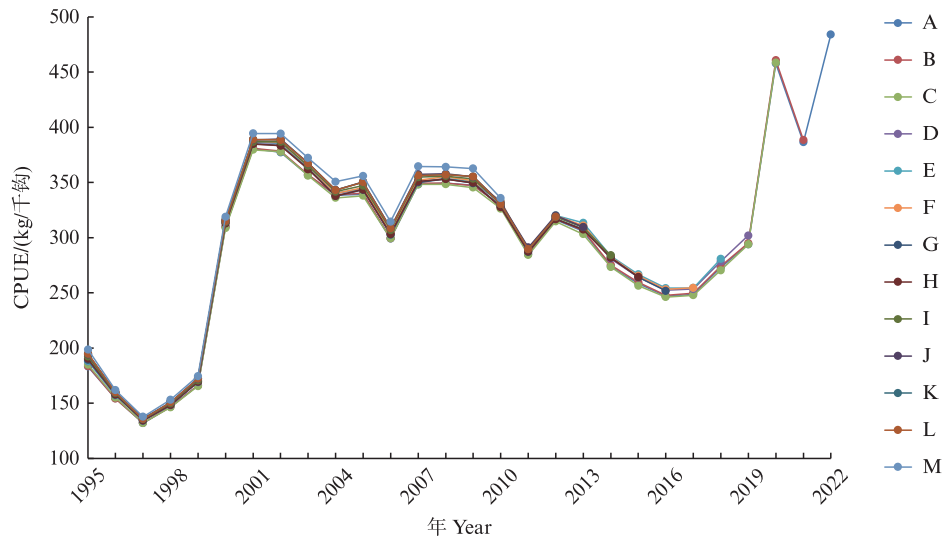


图5 大西洋北部种群1995—2022年不同时间序列年平均标准化CPUE计算结果

Fig. 5 Calculation of annual mean standardised CPUE for different time series for the northern Atlantic stock 1995—2022

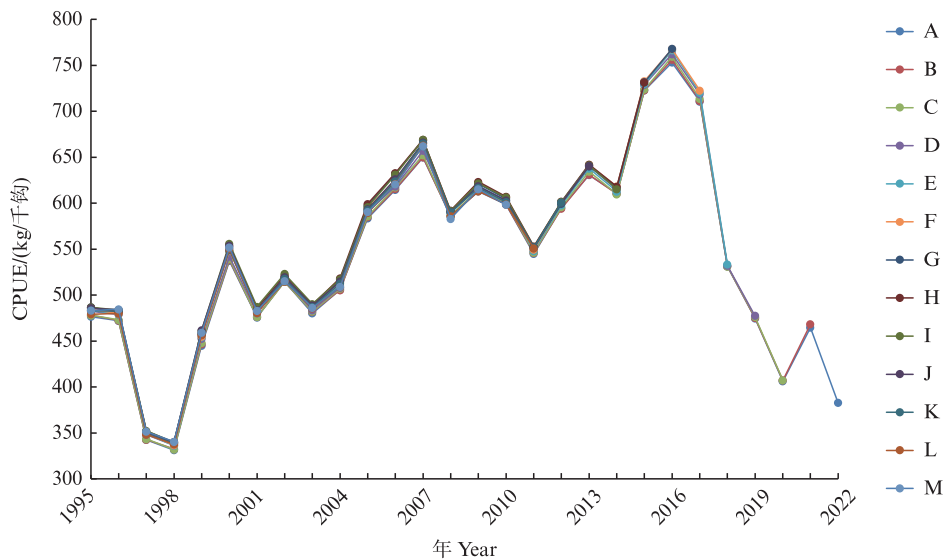


图6 大西洋南部种群1995—2022年不同时间序列年平均标准化CPUE计算结果

Fig. 6 Calculation of annual mean standardised CPUE for different time series for the southern Atlantic stock of 1995—2022

K-means 聚类结果表明,大西洋北部与南部区域的环境变量聚类结果有着显著差异。具体来说,在北部区域,ssh与 sst_{s0} 和 sst_0 被聚为一类,这显示出海表面高度与中层和表层水温之间具有较强的关联性。而在南部区域,ssh与 sss_0 、 sss_{50} 、 sss_{100} 、 npp_{100} 和 sst_{100} 聚为一类,这表明海表面高度与不同深度的盐度、生物净初级生产量以及深层水温之间存在较强的关联性。

通过PCA和K-means聚类相结合筛选出的环境变量在模型构建中发挥了重要作用。研究结果显示,大西洋北部及南部区域的主要环境影响因子存在明显差异,这为深入研究物种适应性和生态环境提供了重要线索。此外,将这些变量纳入sdmTMB模型,能够使我们更加准确地评估环境因素对CPUE的影响,进而为大西洋剑鱼资源的可持续利用和管理提供了重要的科学依据。

3.2 名义 CPUE 与标准化 CPUE 比较

研究表明,大西洋剑鱼南部和北部种群的名义 CPUE 与标准化 CPUE 在年度变化方面呈现出一致性,且标准化 CPUE 的波动幅度相对较小。在传统研究中,名义 CPUE 与标准化 CPUE 的趋势偏差被视作模型缺陷^[45],然而在本研究中,二者高度相似的变化趋势反映了标准化过程中对关键变量的有效调整,使得名义 CPUE 中潜在的非资源丰度因素(如捕捞效率变化和环境因素的干扰)得到了合理校正。CPUE 标准化的核心目标在于消除或显著降低那些无法直接通过渔业资源丰度进行解释的变异因素所带来的影响^[48],这些变异因素包括但不限于渔船的航行路线选择、捕鱼地点偏好、渔具类型以及操作方式的差异等。在标准化的过程中,需要对那些可能影响捕获效率的关键变量予以特别关注,比如渔场的选定、捕鱼技术的不断创新与改进等。在本研究中,同样对可能影响捕捞效率的关键变量给予了特别关注,例如渔场的选择、月效应、年效应以及不同的环境因素。经过标准化后的 CPUE,通过排除这些变量的干扰,能够更加真实地反映资源丰度,确保评估的科学性与可操作性。此外,名义 CPUE 的波动往往受到捕捞行为变化以及外部环境的影响,而标准化 CPUE 则能够更为精准地捕捉到资源丰度的真实变化趋势。

研究还发现,北部种群的 CPUE 在 2022 年达到最高值,1997 年处于最低水平;南部种群则在 2016 年达到峰值,1998 年为最低值。这种年际波动或许反映了剑鱼在不同海域的栖息与迁徙模式存在差异^[49]。在未来的研究中,可以进一步探寻 CPUE 波动的驱动因素,例如特定环境因素所带来的影响,以便更好地理解剑鱼的生态行为及其对渔业的影响。总的来说,经过标准化后的 CPUE 能够获得更具代表性和一致性的资源丰度指数,从而为渔业管理者提供科学的管理依据。

3.3 稳健性分析

回溯性分析在渔业资源评估中是评估模型稳健性的重要工具,特别用于检测模型在不同时间序列下的表现一致性^[41]。本研究运用了传统的回溯性分析方法,即一系列连续种群分析(Sequential population analyses, SPAs),所有分析从相同年份起始,但涵盖不同的时间长度^[50],以

此对大西洋剑鱼北部和南部种群在不同时间序列下的标准化 CPUE 的稳健性进行评估。通过 Mohn's ρ 方法对不同时间序列的标准化结果进行对比,为 CPUE 标准化模型的稳健性提供评估依据。

分析结果表明模型在不同时间序列中的输出具有极高的一致性。这一结果意味着,即便数据窗的长度存在差异,标准化 CPUE 在整个时间序列上的表现依旧稳定,未出现明显的回顾性偏差^[40]。这种高度一致的趋势说明,不同时间序列在关键年份的资源丰度估计未受到数据变化的显著影响,进而减少了评估过程中的不确定性。稳定的标准化 CPUE 能够反映剑鱼种群丰度的真实变化情况,为渔业管理提供科学的决策依据。

从实际意义层面来看,标准化 CPUE 在不同时间序列下的稳健性体现了 sdmTMB 方法在处理剑鱼资源评估数据时的可靠性。鉴于渔业数据会受到季节性变化、捕捞努力量变化以及环境条件变化等诸多因素的影响,标准化的稳健性显得至关重要。不同时间序列的标准化 CPUE 结果呈现出一致的变化趋势,进一步验证了模型结构的稳健性与适应性。这种一致性为渔业资源评估提供了可靠的基准线,支持在不同管理阶段将标准化后的 CPUE 用作相对丰度的可靠估算指标。

在未来的应用中,回溯性分析可作为评估模型稳健性的一项标准程序。通过对不同时间序列 CPUE 的连续性分析,能够进一步降低因时间序列变化带来的误差,确保模型输出的稳健性和可靠性。因此,Mohn's ρ 等稳健性指标为判断模型是否适合长期应用提供了有力支持。在剑鱼资源管理以及其他渔业资源评估中,引入这一分析方法,可以显著提高丰度估算的科学性和数据利用效率,为制定资源保护和利用策略提供坚实的科学依据。在未来的研究中,将进一步优化和完善这一评估稳健性的思路与方法,将其应用于更多的种群以及不同的环境条件之下,进一步验证其普适性与有效性,以适应不同地区和不同种群的渔业资源评估需求。

3.4 对评估及管理的影响

从与渔业相关的 CPUE 时间序列中得出的丰度指数,是种群评估过程中的关键要素,尤其

是在资源数据不完整或者调查频率有限的状况下^[45]。然而,在实际操作中,由于缺乏统一的 CPUE 标准化方法,对时间序列进行分割往往会导致丰度信息的损失,并且增加整体评估的不确定性^[51-52]。这种不连续性会使 CPUE 数据的可用信息大幅减少,对资源丰度的准确评估产生影响。在缺少其他可替代的丰度指数时,保持 CPUE 时间序列的连续性就显得格外重要,以确保模型的完整性并降低评估过程中的误差。

分割时间序列或者不连续的指数可能会导致评估结果不稳定,并且会增加评估过程中的系统性偏差。时间序列分割不但会影响 CPUE 估算的可靠性,还会干扰模型的稳健性,进而影响评估的可信度。例如,不同时间段的组成数据可能在丰度指数上存在冲突,进而引发模型估算结果出现偏差。在没有连续时间序列作为稳定约束的情况下,模型的丰度估计可能会产生不一致的情况^[48]。因此,确保 CPUE 结果的稳健性,提供一个连贯的丰度指数,是极为关键的。这样的连贯性能够有效减少时间序列分割带来的评估误差,为种群丰度的长期监测提供科学支持。

如果剑鱼的 CPUE 评估方法被证实无论在何种条件下都具有稳健性,那么在将该方法应用于其他物种或者不同的 CPUE 标准化方法时,可借鉴相同的验证流程。通过确保方法的稳健性,能够在不同物种和渔场中实现更广泛的适用性。高效且稳定的评估方法不仅可以准确地再现物种的现状,还能有效追踪其变化趋势,从而支持制定有效的保护策略,并优化资源管理和分配。稳定的评估结果还为资源状况的长期监控提供了机制,有助于及时发现并应对潜在问题,避免资源的过度开发和损失^[53]。

在实际管理中,建立稳定且有效的评估和管理流程,能够极大地推动生物多样性的保护和渔业资源的可持续利用。稳定的 CPUE 标准化方法提升了数据的一致性和连续性,为资源管理决策提供了科学依据。管理者能够基于可靠的丰度指数,制定更加科学的捕捞限制、配额政策和渔场规划,确保管理决策的有效性和准确性。广泛应用此方法将有助于全球渔业资源管理的科学性和可持续性发展。

4 结论

本研究利用 1995—2022 年大西洋西班牙延绳钓船队的剑鱼渔业数据,采用 sdmTMB 方法对 CPUE 进行了标准化分析。将 CPUE 数据拆分为多个独立的时间序列,并对这些序列进行建模,以此评估不同时间序列模型的稳健性。研究结果显示,该方法在进行 CPUE 标准化时具有很强的稳健性,这一结论得到回溯性分析的支持。回溯性分析确认了不同时间序列的标准化 CPUE 计算结果的一致性,从而证明了 sdmTMB 方法的可靠性与稳健性。因此,建议将回溯性分析用于评估 CPUE 标准化稳健性的这一流程推广至其他生物种群和标准化方法中,以提升评估结果的可信度与可靠性。

综上所述,本研究为 CPUE 标准化的稳健性验证提供了一个合理的方法,同时为大西洋剑鱼的评估提供了稳定可靠的 CPUE,为科学的渔业管理决策提供了坚实的数据支持。稳健性的验证不仅限于剑鱼种群的资源评估,同样适用于其他海洋生物种群,有助于推动全球渔业资源的可持续管理。

本研究仅使用了大西洋西班牙延绳钓船队的剑鱼渔业数据,数据来源相对单一。虽然在一定程度上能够反映该区域剑鱼渔业的情况,但可能无法涵盖所有影响剑鱼 CPUE 的因素。此外,本研究在分析过程中对一些重要的外部环境变量(如洋流等海洋学因子以及海洋生态系统中饵料生物的动态变化等)的综合考虑还不够全面。对此,后续将收集更多捕捞船队的剑鱼渔业数据,拓宽数据的覆盖范围,使数据更具代表性。其次,基于全球气候变化背景,重点关注海洋环境的长期变化趋势及其对剑鱼及其他海洋生物种群分布、行为的影响,进一步探讨这些变化如何影响 CPUE 标准化方法的稳健性。通过构建考虑环境变化的动态模型,预测未来渔业资源状况以及 CPUE 标准化方法的适用性,为应对全球渔业资源变化和可持续管理提供前瞻性的研究成果。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 江俊涛, 朱江峰, 耿喆. 应用 JABBA 和 JABBA-Select 模型评估印度洋剑鱼资源[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(3): 677-690.
JIANG J T, ZHU J F, GENG Z. Stock assessment for Indian Ocean swordfish (*Xiphias gladius*) with JABBA and JABBA-Select models [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(3): 677-690.
- [2] 赵荣兴, 缪圣赐. 世界剑鱼类的基本概况[J]. 现代渔业信息, 2006, 21(11): 13-16.
ZHAO R X, MIAO S C. Outline of swordfishes in the world[J]. Modern Fisheries Information, 2006, 21(11): 13-16.
- [3] METHOT JR R D. External review of ICCAT Atlantic Swordfish Stock Assessment [J]. Collective Volume of Scientific Papers ICCAT, 2017, 74(3): 968-974.
- [4] 聂启义, 黄硕琳. 公海金枪鱼渔业管理趋势研究[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(4): 587-593.
NIE Q Y, HUANG S L. Study on the trend of tuna fishery management on high seas[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(4): 587-593.
- [5] PARKER D, KIKUCHI E, MOURATO B L. Assessment of the South Atlantic Swordfish (*Xiphias Gladius*) stock using JABBA [J]. Collective Volume of Scientific Papers ICCAT, 2022, 79(2): 608-639.
- [6] WINKER H, KIMOTO A, MOURATO B L, et al. Development of Bayesian state-space surplus production model JABBA for assessing the Mediterranean swordfish (*Xiphias gladius*) stock [J]. ICCAT Collective Volumes of Scientific Papers, 2020, 77(3): 508-536.
- [7] SCHIRRIPIA M J, HORDYK A. Migrating the North Atlantic swordfish stock assessment model to an updated version of stock synthesis with analysis of the current minimum size regulation [J]. Collective Volume of Scientific Papers ICCAT, 2020, 77(3): 654-668.
- [8] SCHIRRIPIA M. Current status of the northern swordfish (*Xiphias gladius*) stock in the Atlantic Ocean 2022: post-decisional stock assessment model [J]. Collective Volume of Scientific Papers ICCAT, 2022, 79(2): 715-748.
- [9] HONKALEHTO T, RESSLER P H, TOWLER R H, et al. Using acoustic data from fishing vessels to estimate walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) abundance in the eastern Bering Sea [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2011, 68(7): 1231-1242.
- [10] HUBERT W A, FABRIZIO M C. Relative abundance and catch per unit effort [M]//GUY C S, BROWN M L. Analysis and Interpretation of Freshwater Fisheries Data. Bethesda: American Fisheries Society, 2007: 279-325.
- [11] BISHOP J. Standardizing fishery-dependent catch and effort data in complex fisheries with technology change [J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2006, 16(1): 21-38.
- [12] 陶雅晋, 冯波, 易木荣, 等. 基于渔港抽样调查不同捕捞方式 CPUE 单位标准化新方法[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(2): 15-24.
TAO Y J, FENG B, YI M R, et al. A novel approach to unit standardization of CPUE for multiple types of fishing gear based on fishing port sampling surveys [J]. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(2): 15-24.
- [13] CAMPBELL R A. Constructing stock abundance indices from catch and effort data: some nuts and bolts [J]. Fisheries Research, 2015, 161: 109-130.
- [14] 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.
- [15] THORSON J T, MAUNDER M N, PUNT E. The development of spatio-temporal models of fishery catch-per-unit-effort data to derive indices of relative abundance [J]. Fisheries Research, 2020, 230: 105611.
- [16] THORSON J T, PINSKY M L, WARD E J. Model-based inference for estimating shifts in species distribution, area occupied and centre of gravity [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2016, 7(8): 990-1002.
- [17] ICCAT. T2CE subset for PS FAD/FSC on ETRO fishery from 1991 to 2021 [EB/OL]. (2023-01-31). <https://iccat.int/en/accessingdb.html>.
- [18] LIMING S, LIUXIONG X. Preliminary analysis of the biological characteristics of swordfish (*Xiphias gladius*) sampled from the Chinese tuna longlining fleet in the central Atlantic ocean [J]. Collective Volume of Scientific Papers ICCAT, 2004, 56(3): 940-946.
- [19] AROCHA F, LEE D W. Maturity at size, reproductive seasonality, spawning frequency, fecundity and sex ratio in swordfish from the Northwest Atlantic [J]. Collective Volume of Scientific Papers-International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, 1996, 452: 350-357.
- [20] AMORIM A, ARFELLI C. Reproducción del pez espada (*Xiphias gladius*, L. 1758) en el sudeste y sur del Brazil [J]. Collective Volume of Scientific Papers ICCAT, 1979, 624-626.
- [21] SMITH B L, LU C P, GARCÍA-CORTÉS B, et al. Multilocus Bayesian estimates of intra-oceanic genetic differentiation, connectivity, and admixture in Atlantic swordfish (*Xiphias gladius* L.) [J]. PLoS One, 2015, 10(6): e0127979.
- [22] NEILSON J D, PAUL S D, SMITH S C. Stock structure of swordfish (*Xiphias gladius*) in the Atlantic: a review of the non-genetic evidence [J]. Collective Volume of Scientific Papers ICCAT, 2007, 61: 25-60.

- [23] SHARP G D, CSIRKE J, GARCIA S. Modelling fisheries: what was the question [C]//Proceedings of the Expert Consultations to Examine Changes in Abundance and Species Composition of Neritic Fisheries Resources. San Jose: 1983: 568-595.
- [24] GOODYEAR C P, SCHIRRIPIA M, FORRESTAL F. Longline data simulation: a paradigm for improving CPUE standardization [J]. Collective Volume of Scientific Papers ICCAT, 2017, 74(2): 379-390.
- [25] PALLARÉS P, SCOTT G, NEILSON J, et al. Report of the 2006 Atlantic swordfish stock assessment session [C/OL]. (2006-09-04) [2024-06-22]. <https://www.iccat.int/Documents/Meetings/Docs/SCI-040%20EN.pdf>.
- [26] TAKAHASHI M, OKAMURA H, YOKAWA K, et al. Swimming behaviour and migration of a swordfish recorded by an archival tag [J]. Marine and Freshwater Research, 2003, 54(4): 527-534.
- [27] HIJMANS R J, VAN ETEN J, SUMNER M, et al. Raster: geographic data analysis and modeling [EB/OL]. (2024-10-02). <https://cran.r-project.org/web/packages/raster/raster.pdf>.
- [28] DING C, HE X F. K-means clustering via principal component analysis [C]//Proceedings of the Twenty-first International Conference on Machine Learning. Banff, Alberta: ACM Press, 2004: 29.
- [29] HARTIGAN J A, WONG M A. Algorithm AS 136: A K-means clustering algorithm [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1979, 28(1): 100-108.
- [30] QI J P, YU Y W, WANG L H, et al. K*-means: an effective and efficient k-means clustering algorithm [C]//2016 IEEE International Conferences on Big Data and Cloud Computing (BDCloud), Social Computing and Networking (SocialCom), Sustainable Computing and Communications (SustainCom) (BDCloud-SocialCom-SustainCom). Atlanta: IEEE, 2016: 242-249.
- [31] JOLLIFFE I T. Principal component analysis and factor analysis [M]//JOLLIFFE I T. Principal Component Analysis. New York: Springer, 1986: 115-128.
- [32] PAUKERT C P, WITTIG T A. Applications of multivariate statistical methods in fisheries [J]. Fisheries Magazine, 2002, 27(9): 16-22.
- [33] JANŽEKOVIČ F, NOVAK T. PCA - a powerful method for analyze ecological niches [M]//SANGUANSAT P. Principal Component Analysis - Multidisciplinary Applications. InTech, 2012.
- [34] 范秀梅, 崔雪森, 唐峰华, 等. 基于PCA-GAM的阿拉伯海公海鸚鵡贼资源量空间分布预测模型研究[J]. 水产学报, 2022, 46(12): 2340-2348.
- FAN X M, CUI X S, TANG F H, et al. Research on the prediction model of spatial distribution of *Sthenoteuthis oualaniensis* in the open sen Arabian Sea based on PCA-GAM [J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(12): 2340-2348.
- [35] ANDERSON S C, WARD E J, ENGLISH P A, et al. sdmTMB: an R package for fast, flexible, and user-friendly generalized linear mixed effects models with spatial and spatiotemporal random fields [EB/OL]. (2022-03-27) [2024-10-27]. <http://biorxiv.org/lookup/doi/10.1101/2022.03.24.485545>.
- [36] THORSON J T, ADAMS G, HOLSMAN K. Spatio-temporal models of intermediate complexity for ecosystem assessments: A new tool for spatial fisheries management [J]. Fish and Fisheries, 2019, 20(6): 1083-1099.
- [37] CORREA G M, KAPLAN D M, GRANDE M, et al. Standardized catch per unit effort of yellowfin tuna in the Atlantic Ocean for the European purse seine fleet operating on floating objects [J]. Collective Volume of Scientific Papers ICCAT, 2024, 81(2): 1-26.
- [38] HEBERT N E, SAMEOTO J A, KEITH D M, et al. Comparing spatiotemporal species distribution models: a case study of a Scotian Shelf sea cucumber (*Cucumaria frondosa*) [J]. Ecosphere, 2024, 15(4): e4822.
- [39] CHIARINI M, GUICCIARDI S, ANGELINI S, et al. Accounting for environmental and fishery management factors when standardizing CPUE data from a scientific survey: a case study for *Nephrops norvegicus* in the Pomo Pits area (Central Adriatic Sea) [J]. PLoS One, 2022, 17(7): e0270703.
- [40] MOHN R. The retrospective problem in sequential population analysis: an investigation using cod fishery and simulated data [J]. ICES Journal of Marine Science, 1999, 56(4): 473-488.
- [41] KELL L T, SHARMA R, KITAKADO T, et al. Validation of stock assessment methods: is it me or my model talking? [J]. ICES Journal of Marine Science, 2021, 78(6): 2244-2255.
- [42] HASHIMOTO M, NISHIJIMA S, YUKAMI R, et al. Spatiotemporal dynamics of the Pacific chub mackerel revealed by standardized abundance indices [J]. Fisheries Research, 2019, 219: 105315.
- [43] MOHN P, WOHLFARTH E P. The Curie temperature of the ferromagnetic transition metals and their compounds [J]. Journal of Physics F: Metal Physics, 1987, 17(12): 2421.
- [44] 刘奕伶, 葛继稳, 李艳元, 等. 古夫河着生藻类优势种体积与水质因子的相关性研究 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(7): 2182-2191.
- LIU Y L, GE J W, LI Y Y, et al. Correlations between the volume of dominant periphytic algae species and the water quality parameters in Gufu River [J]. China Environmental Science, 2015, 35(7): 2182-2191.
- [45] FORRESTAL F C, SCHIRRIPIA M, GOODYEAR C P,

- et al. Testing robustness of CPUE standardization and inclusion of environmental variables with simulated longline catch datasets [J]. *Fisheries Research*, 2019, 210: 1-13.
- [46] YSEBAERT T, HERMAN P M J. Spatial and temporal variation in benthic macrofauna and relationships with environmental variables in an estuarine, intertidal soft-sediment environment [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 244: 105-124.
- [47] NIXON S W. Physical energy inputs and the comparative ecology of lake and marine ecosystems [J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, 33(2/4): 1005-1025.
- [48] HOYLE S D, CAMPBELL R A, DUCHARME-BARTH N D, et al. Catch per unit effort modelling for stock assessment: a summary of good practices [J]. *Fisheries Research*, 2024, 269: 106860.
- [49] NEILSON J, AROCHA F, CASS-CALAY S, et al. The recovery of Atlantic swordfish: the comparative roles of the regional fisheries management organization and species biology [J]. *Reviews in Fisheries Science*, 2013, 21(2): 59-97.
- [50] SINCLAIR A, GASCON D, O' BOYLE R, et al. Consistency of some northwest Atlantic groundfish stock assessments [J]. *NAFO Scientific Council Studies*, 1991, 16: 59-77.
- [51] HOYLE S, LANGLEY A, HAMPTON J. Stock assessment of albacore tuna in the South Pacific Ocean [C]//4th Meeting of the Scientific Committee of the Western and Central Pacific Fisheries Commission. Port Moresby, Papua New Guinea. 2008: 11-22.
- [52] LABELLE M, HAMPTON J. Stock assessment of albacore tuna in the South Pacific Ocean [EB/OL]. 2003 [2024-07-12]. http://www.spc.int/DigitalLibrary/Doc/FAME/Meetings/SCTB/16/ALB_1.pdf.
- [53] 刘瑞玉. 中国海物种多样性研究进展 [J]. *生物多样性*, 2011, 19(6): 614-626.
- LIU R Y. Progress of marine biodiversity studies in China seas [J]. *Biodiversity Science*, 2011, 19(6): 614-626.

CPUE standardisation in the Atlantic swordfish longline fishery based on sdmTMB

WAN Faruyi¹, LIN Hongyu¹, ZHANG Fan^{1,2}

(1. *College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*;
2. *Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China*)

Abstract: In order to improve the reliability of assessment results and support sustainable management, evaluating the robustness of methods for standardizing catch per unit effort (CPUE) prior to stock resource assessment is necessary. Fishery stock assessments require long-term and continuous work, and their accuracy is critical for management decisions and species conservation. In this study, we analysed data from the Spanish longline fleet in the Atlantic Ocean between 1995 and 2022 to standardize CPUE in the Atlantic swordfish fishery using the sdmTMB method, and a retrospective analysis using Mohn's ρ method was conducted to validate the robustness of 13 different time series of data (A-M). The results demonstrated minor variations in the standardized CPUE outcomes across different time series. The retrospective analysis further validated the consistency of the standardized CPUE outcomes. The study concluded that the sdmTMB method for standardized CPUE of Atlantic swordfish exhibited high stability and can accurately reflect the relative resource abundance of this stock. This study provides substantial support for reliable resource assessment and scientific fisheries management decisions.

Key words: Atlantic swordfish; CPUE standardization; robustness; sdmTMB