

DOI: 10.12264/JFSC2023-0346

基于结构方程模型研究环境因子对毛里塔尼亚双拖鲹 CPUE 的影响

张鸿霖¹, 马有成¹, 宋厚成¹, 张健^{1, 2, 3, 4}, 曾志坚⁵

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海海洋大学, 上海 201306;
3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海海洋大学, 上海 201306;
4. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海海洋大学, 上海 201306;
5. 宏东渔业股份有限公司, 福建 福州 350015

摘要: 探索渔业资源丰度与环境因子的关系, 并掌握种群分布对环境变化的响应机制, 是养护资源、实现渔业可持续发展的基础。然而, 渔业资源的变化受多个环境因素的综合影响, 这些因素之间存在复杂且相关的关系。目前的研究主要集中于环境因子对种群分布和资源丰度等直接影响, 而忽视了环境因素之间的相互作用。为了探索不同环境因子及其相互关系对毛里塔尼亚双拖鲹种群资源量的影响机制与路径, 本研究基于 2017—2019 年毛里塔尼亚海域双拖渔业鲹(*Katsuwonus pelamis*)单位捕捞努力量渔获量(CPUE), 采用结构方程模型(SEM)构建海表面温度(SST)、海表面盐度(SSS)、海面高度异常(SLA)、溶解氧(DO)和叶绿素 a 浓度(Chl-a) 5 个环境因子对鲹 CPUE 直接和间接影响。结果表明: SEM 模型具有良好的拟合效果; SST、SSS、SLA、DO 和 Chl-a 对鲹 CPUE 均有直接影响, 其中 DO 和 SLA 对 CPUE 有着显著正相关影响, 而 SST、SSS 和 Chl-a 对 CPUE 有显著负相关影响; SST 等环境因子还会通过多种路径对鲹 CPUE 产生间接影响。研究揭示了毛塔海域 SST 通过直接影响或通过影响其他环境因子而间接影响鲹种群资源变动的潜在机制。

关键词: 鲹; 拖网; CPUE; 结构方程模型; 环境因子; 影响路径

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)04-0465-11

鲹(*Katsuwonus pelamis*) 是一种高度洄游的热带金枪鱼, 广泛分布于大西洋、印度洋和太平洋, 是全球海洋渔业最为重要的渔业资源之一, 年捕捞量达 282 万 t^[1]。鲹不仅为人类持续提供着宝贵的动物蛋白, 作为高级捕食者, 也是维系海洋生态系统稳定的重要环节^[2-3]。近年来, 中西太平洋和大西洋等海域鲹上岸量一直处于平衡或稳步增长趋势, 现有的评估结果表明种群总体处于可持续发展状态^[4]。然而, 也有迹象表明鲹群体产卵潜力有所下降, 低龄群体面临较为严重的渔业压力^[5]。开展海洋环境对鲹种群分布和资源丰度的影响研究, 探索鲹栖息环境以及洄游路径是实现鲹种群资源养护管理和可持续开发利用的

基础。

海表面温度(sea surface temperature, SST)影响着鲹生长、繁殖和洄游等行为, 是表征鲹的栖息地特征的关键环境要素^[6], 因鲹属于狭盐性鱼类, 喜生活于高盐海域, 因此海表面盐度(sea surface salinity, SSS)的变化会影响其大尺度的空间分布^[2], 海面高度异常(sea level anomaly, SLA)可以提供栖息地的海洋环境变化等相关信息并影响鲹的资源丰度和空间分布^[7], 溶解氧(dissolved oxygen, DO)影响鲹的新陈代谢并限制其垂直分布^[2], 叶绿素 a 浓度(chlorophyll a concentration, Chl-a)通过影响饵料分布进而影响鲹种群分布^[8]。目前有关环境因子对鲹种群分布和资源丰度等影响的研

收稿日期: 2023-12-30; 修订日期: 2024-02-17.

基金项目: 农业农村部全球重要鱼种资源动态监测评估项目.

作者简介: 张鸿霖(2000–), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源. E-mail: 765488533@qq.com

通信作者: 张健, 博士, 教授, 研究方向为生态型渔具渔法. E-mail: j-zhang@shou.edu.cn

究中,大多采用广义加性模型(generalized Additive Model, GAM)^[9]、最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt)^[10]和 提升回归树模型(boosted regression trees, BRT)^[11]等统计或学习模型,这些模型大多只探索相互独立环境因子或因因子交互作用对渔业单位捕捞努力量渔获量(catch per unite effort, CPUE)的直接影响^[12],这个过程中通常基于因子共线性等剔除部分因子,很少考虑环境因子之间相互关系及其可能对 CPUE 产生的间接影响,使得在探索环境因子与资源丰度关系时缺乏全面视角^[13]。

相关研究表明,包括气候变化、海洋环境变化等在内的许多复杂因素驱动着渔业资源的变化^[14]。种群分布及丰度变化通常取决于众多因素的综合作用,这些复杂且相关的因素可能对海洋物种及生态系统造成交互、复杂和放大的影响^[15]。一些学者尝试探索因子相互作用对种群和资源的影响,如 Sirabella 等^[16]采用典型相关分析研究了巴伦支海以及北海区域鳕鱼补充量与海水温度、北大西洋涛动(north atlantic oscillation, NAO)指数之间的关系, Ottersen 等^[17]采用回归分析等统计分析方法研究了巴伦支海鳕鱼补充量与 NAO 指数、海水温度等指标的关系等。与其他多变量统计方法不同,结构方程模型(Structural Equation Model, SEM)是由测量模型和结构模型组成,测量模型反映潜在变量与测量变量之间多元关系,而结构模型则反映潜在变量之间的关系,基于这些关系进而判定因果关系的方法^[18]。SEM 包含了多个变量之间直接和间接的因果关系,通常使用路径关系(大多使用箭头等图示方法)展示因果关系及对相关观测变量的影响强度^[19]。将路径分析与多因素分析相结合,通过理论假设驱动建模过程,同时量化多个变量间的直接和间接因果关系,不仅可以揭示个体影响因素的相互关系和强度,还能对整体模型进行拟合和评估,以更加全面的角度探索影响响应变量的潜在机制^[13-20],已被广泛应用于生态学等领域^[21]。

毛里塔尼亚(后称毛塔)海域地处大西洋中东部^[22],该海域加那利寒流和几内亚暖流交汇形成显著涌升流将海底丰富的营养物质带到表层,为

鱼类提供生存所需的饵料和有利的栖息场所,是西北非海域重要的渔场之一^[23]。近年来,随着毛塔海域底层渔业资源被充分开发,鲐鱼和沙丁鱼(*Sardina pilchardus*)等中上层渔业资源已逐渐成为渔业开发的目标种类^[24],也是我国过洋性渔业的重要渔获物种。随着当地沿海各国对资源保护重视程度的不断提升,在该海域开展环境因子对鲐资源丰度影响研究将有助于科学养护渔业资源,实现渔业可持续发展。

鉴于此,本研究使用 2017—2019 年毛塔海域鲐的双拖渔业数据,结合 SST、SSS、SLA、DO 和 Chl-a 海洋环境因子,采用结构方程模型构建不同环境因子对渔业 CPUE 影响路径关系,揭示环境因子及相互关系对鲐 CPUE 的影响,探究 SEM 在渔业资源研究环境因子与资源丰度分析中的适用性,了解环境因子对 CPUE 影响的潜在路径与机制,为养护毛塔鲐渔业资源、实现渔业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 渔业数据 渔业数据来源于宏东国际(毛塔)渔业发展有限公司 2017—2019 年双拖作业渔捞日志,作业渔船共 11 艘,船舶总长 44.18 m,主机功率 698 kW;拖网网具规格 600 m×130 m (130 m),网囊网目尺寸 60 mm,渔船作业范围为 20°W~16°W, 15°N~21°N (图 1)。

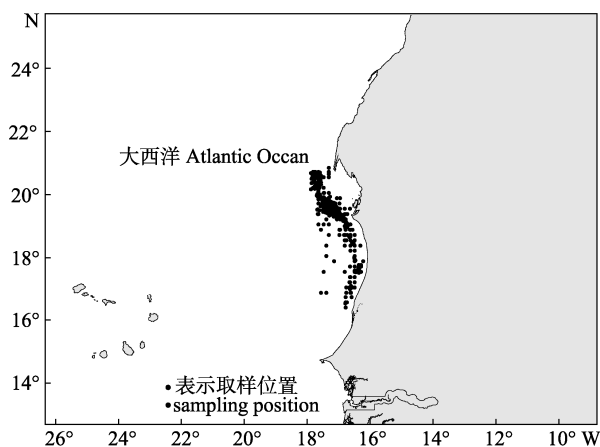


图 1 鲐捕捞作业范围示意图

Fig. 1 Sketch map of the scope of operation of skipjack tuna fishery

使用 CPUE 作为指示鲤资源丰度的指标。由于船队使用了相同规格的拖网, 且渔法及作业习惯相近, 因此使用单元渔区 ($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$) 内月度单位作业时长的渔获量作为渔业 CPUE, 即:

$$CPUE_{y,m,i} = \frac{\sum C_{y,m,i}}{\sum E_{y,m,i}} \quad (1)$$

式中, $\sum C_{y,m,i}$ 为第 y 年第 m 月 i 单元渔区的总渔获量, 单位为 kg; $\sum E_{y,m,i}$ 为第 y 年第 m 月 i 单元渔区内总作业时长, 单位为 h。

1.1.2 环境数据 选择 SST、SSS、SLA、DO 和 Chl-a 5 个环境因子数据来研究环境因子对毛塔海域鲤 CPUE 的影响。数据来自哥白尼海洋数据中心网站 <https://data.marine.copernicus.eu/>, 空间范围为 $25^{\circ}W \sim 15^{\circ}W$, $15^{\circ}N \sim 25^{\circ}N$, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 时间分辨率为月; 并基于单元渔区的划分对 SST、SSS、SLA、DO 和 Chl-a 5 个环境数据进行标准化处理。

1.2 数据分析方法

1.2.1 环境因子相关性 利用皮尔逊相关系数检验环境因子之间的相关关系^[25]。

1.2.2 SEM 构建 SEM 建模需要对系统因果关系进行假设, 基于相关海洋学知识以及环境因子对鲤栖息地影响的相关研究。SST 是全面了解海洋和大气之间与鱼类行为相关的相互作用的重要变量^[26], 是影响鱼类活动的关键环境因子之一, 对多种海洋环境的 DO^[27]、Chl-a^[28]、SLA 和 SSS 等环境因子产生影响^[29], 且 SSS、DO、SLA 和 Chl-a 浓度之间存在某些相关关系。本研究先假设鲤 CPUE 可以用所有不同的环境因子来解释, 如 SST 可以通过各种直接和间接途径影响鲤 CPUE, 然后利用结构方程模型(SEM)对所选因子进行初步组合, 确定鲤 CPUE 的关键驱动因子, 构建初始 SEM 模型。

本研究中 SEM 模型未考虑潜变量, 即所有的变量均为可观测变量, 构建环境因子与鲤 CPUE 之间的关系建模:

$$\ln(CPUE_i + 1) = \beta_0 + \beta_1 SST_i + \beta_2 SSS_i + \beta_3 SLA_i + \beta_4 DO_i + \beta_5 Chl - a_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中, β_0 为截距, β_1 至 β_5 是各自变量的回归系数, ε_i 为残差项; $\ln(CPUE_i + 1)$ 对 CPUE 进行转

换以避免零值。

应用 R 4.2.3 软件中的“lavaan”包构建结构方程模型, 使用最大似然法作为参数估计方法, 并绘制路径关系。为比较不同量纲指标间的作用程度, 采用标准化路径系数($[-1, 1]$)表示不同因子对鲤 CPUE 的直接和间接影响程度, 数值越大表示影响程度越大^[30]。

1.2.3 模型拟合优劣性和模型修正 通过卡方分布对 P 值的比较来评估模型的拟合优度^[31], 当卡方检验的 P 值接受观测数据的方差协方差矩阵与模型预测的方差协方差矩阵相匹配的初始假设^[32]。模型拟合指数是检验理论结构模型与数据拟合程度的统计指标, 可以测量不同类别的模型拟合指标, 如模型复杂性、样本量、相关性和绝对性等^[33], 本研究采用拟合优度指数(GFI, $[0, 1]$)、比较拟合指数(CFI, $[0, 1]$)、标准化残差(SRM)和近似均方根误差(RMSEA)来验证模型的质量^[15]。GFI 和 CFI 越接近 1, 表明模型拟合越好, 通常采用 GFI > 0.90 作为拟合优劣性阈值; 良好的模型拟合 SRM 应 < 0.09 , RMSEA 应 < 0.05 , 表明模型的适应度较好。当模型不通过检验时, 根据结果中的 mi 值(modification indices)模型修正指数结合具体的路径关系进行模型修正, 包括增加或删除路径, 假设模型的拟合优度得到提高, 再通过其他模型拟合指标识别, 从而获得最优模型。

2 结果与分析

2.1 鲤 CPUE 和环境因子随时间的变化趋势

2017—2019 年毛塔海域鲤 CPUE 的月度变化如图 2a 所示, 鲤 CPUE 月平均总体趋势呈现明显的季节性变化, 12 月至 1 月和 7 月至 8 月鲤月平均 CPUE 较大, 随后几个月有所下降并趋于稳定。5 个环境因子随月度的变化如图 2b~f 所示。

2.2 环境因子之间的相关关系

环境变量之间相关性如图 3 所示。SST 和 SLA 高度相关($r=0.892$, $P<0.001$), 且为正相关, 而 SST 与 SSS、Chl-a 和 DO 均呈现负相关的关系, 相关系数分别为 -0.334 、 -0.583 和 -0.290 , 表明毛塔海域所有的环境因子都受到 SST 的相互作用。其他环境因子之间也存在显著相关关系。

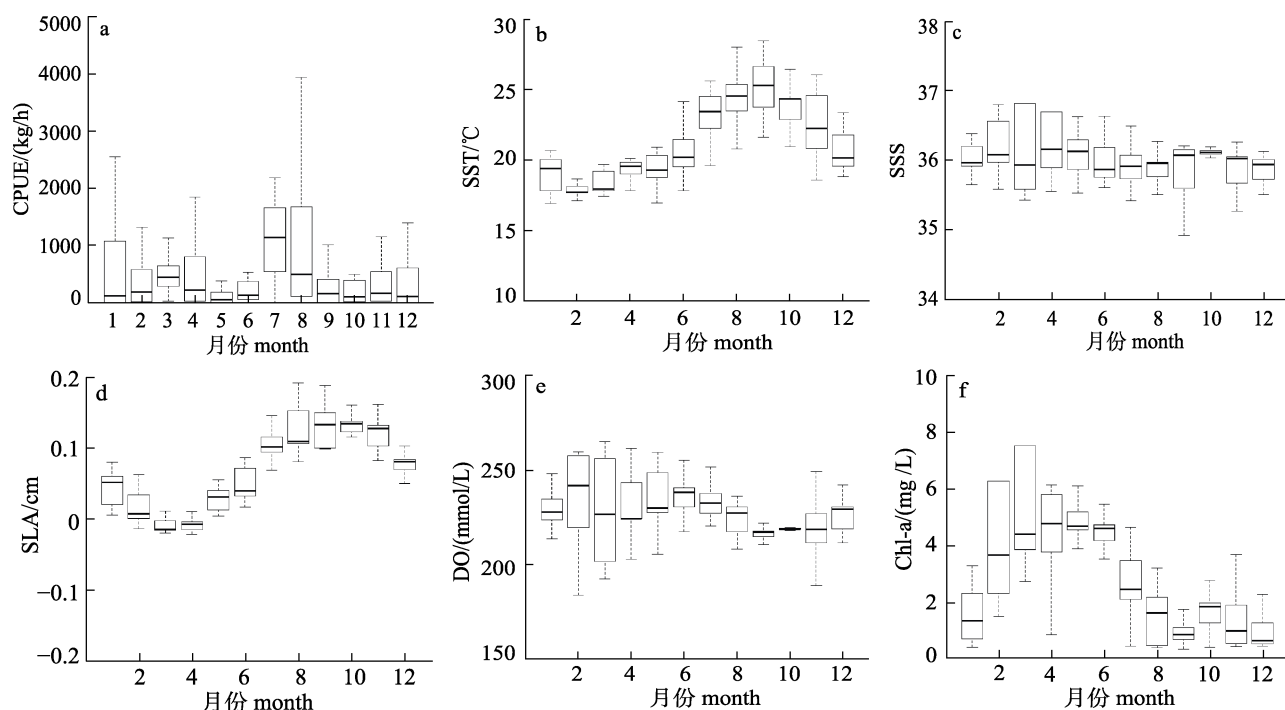


图 2 鲣 CPUE 和环境因子的月度变化

a. CPUE. b. SST. c. SSS. d. SLA. e. DO. f. Chl-a.

Fig. 2 Monthly changes in skipjack tuna CPUE and environmental factors

a. CPUE. b. SST. c. SSS. d. SLA. e. DO. f. Chl-a.

2.3 结构方程模型

2.3.1 拟合优度检验 结构方程模型的拟合优度检验结果如表 1 所示。从表 1 可以看出, 最终 SEM 模型的拟合评价均符合标准, 表明变量的指标体系和逻辑关系合理可靠, 可以用于分析不同环境要素及其相互关系对鲣 CPUE 的影响。

2.3.2 SEM 的拟合结果 SEM 模型结果如图 4 所示。从图中可以看出 SST、SSS、DO、SLA 和 Chl-a 对鲣 CPUE 均存在显著的直接影响, 但环境因子通过对相关环境因子影响进而对 CPUE 产生的间接影响也不可忽视。

模拟拟合结果表明, SST 对鲣 CPUE 存在直接影响, 呈显著负相关影响(路径系数为 -0.17)。除直接影响外, SST 还可以通过影响 SLA 等途径间接影响鲣 CPUE, 其中 SST 通过正相关影响 SLA(路径系数为 0.90)进而间接影响鲣 CPUE, 路径系数为 0.10 (0.9×0.11), 与直接效应相近。此外, SST 还通过影响 SSS(路径系数为 -0.24)和 DO(路径系数为 -0.16)对鲣 CPUE 产生间接影响。

SSS 对鲣 CPUE 存在直接影响, 且为负相关

关系(路径系数为 -0.04), SSS 还通过影响 DO(路径系数为 0.25)和 SLA(路径系数为 0.10)间接影响鲣 CPUE, 其中 SSS 通过 DO 间接影响(路径系数为 0.05)鲣 CPUE 效应较强, 甚至略大于直接影响。

DO 除了对鲣 CPUE 产生显著正相关的直接影响(路径系数为 0.18)外, 还通过影响 Chl-a(路径系数为 0.26)和 SLA(路径系数为 -0.10)间接影响鲣 CPUE。而 SLA 除了对鲣 CPUE 产生显著正相关的直接影响关系(路径系数为 0.11)外, 也可以通过影响 Chl-a(路径系数为 -0.60)间接影响鲣 CPUE, 间接路径系数为 0.13 , 这一间接影响效应大于其直接影响效应。

Chl-a 对鲣 CPUE 产生直接影响, 且为显著负相关关系(路径系数为 -0.21)。

3 讨论

3.1 环境因子对鲣 CPUE 的直接影响

关于海洋环境因子的变化和对渔业资源量影响一直是渔业科学中的关注焦点, 其中温度、溶解氧、猎物可用性和静水压力是限制大洋性鱼类

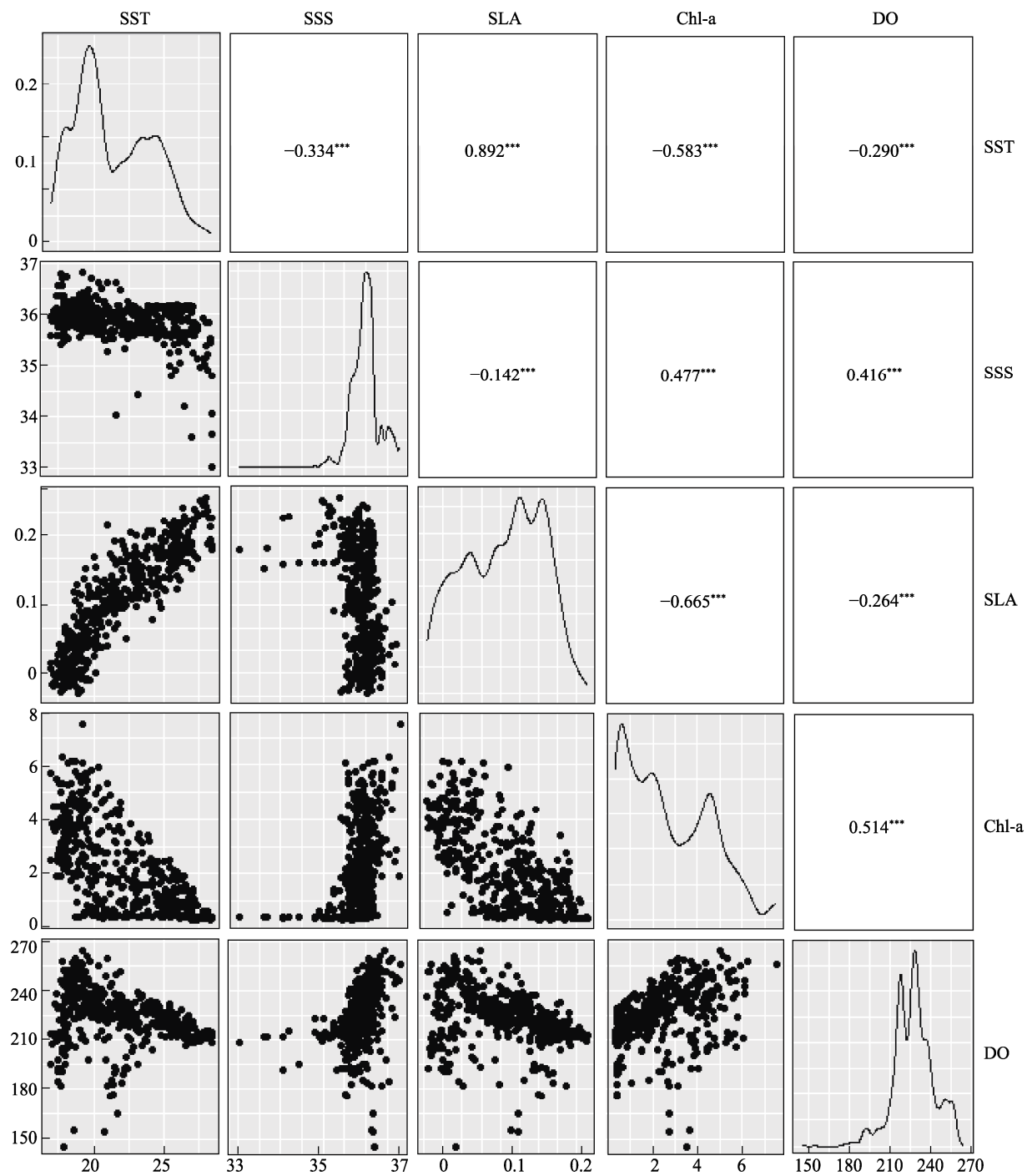


图 3 环境因素之间的皮尔逊相关图
Fig. 3 Pearson correlation plot between each pair of environmental factors

资源分布的 4 个主要因素^[34]。海表面温度是影响鱼类活动的关键环境因子之一，它可以直接或间接的影响鱼类产卵^[35]、胚胎发育^[36]、存活率^[37]、摄食代谢^[38]、迁徙洄游^[39]和栖息地分布^[40]。鲉作为中上层鱼类，易受海表面温度变化的直接影响，

冯虎年等^[41]发现中西太平洋海域鲉 CPUE 随着 SST 的增加而降低，Vaiholo 等^[42]发现汤加群岛水域鲉 CPUE 也随 SST 的增加而降低。此次基于 SEM 拟合同样发现 SST 对鲉 CPUE 的直接影响是显著的负相关影响，较高的海表面温度，对鲉的

生存和分布产生了负面影响, 鳀可能会迁徙到更适宜的水域, 最终导致 CPUE 下降。

表 1 结构方程模型的拟合优度检验结果
Tab. 1 Results of goodness-of-fit tests for structural equation modeling

	P 值 P value	拟合优度 指数 GFI	比较拟合 指数 CFI	标准化残差 SRMR	均方根误差 RMSEA
模型结果 model result	0.391	1.000	1.000	0.004	0.000

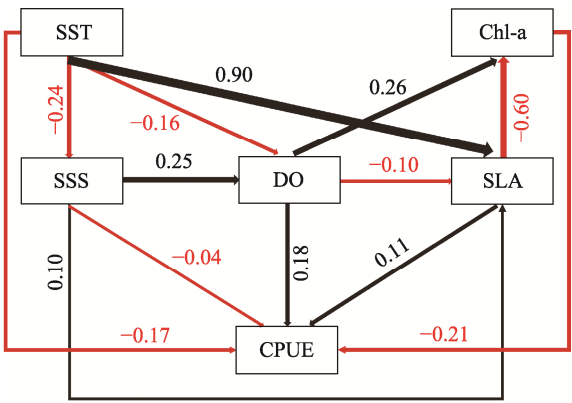


图 4 基于结构方程模型的路径图

黑色、红色和虚线箭头分别表示正显著、负显著和不显著的路径关系。箭头上的数值为标准化路径系数, 箭头粗细表示标准化路径系数的相对大小, 且间接影响以各路径系数相乘得到。

Fig. 4 Path diagram based on structural equation model
Black, red, and dashed arrows indicate positively significant, negatively significant, and non-significant path relationships, respectively. The values on the arrows are the standardized path coefficients, and the thickness of the arrows indicates the relative size of the standardized path coefficients and the indirect influence is obtained by multiplying the path coefficients.

海表面盐度是一个重要的非生物因素, 通过影响鱼类自身的渗透压调节从而改变鱼类的集群和洄游^[43]。金枪鱼资源的丰度和分布也通常表现出与 SSS 的显著相关性^[44], 鳀作为一种狭盐性鱼类, 栖息地主要分布在盐度较高的海域, 其种群资源分布与 SSS 有着较强的相关性^[45]。Yen 等^[46]基于栖息地指数模型发现鳀 CPUE 随 SSS 的增加先上升后下降。本研究发现 SSS 对鳀 CPUE 虽有负向直接影响, 但影响较小, 这可能与鳀栖息的海域特征相关, 毛塔金枪鱼渔业主要位于沿海区域, 距离大陆架近且存在涌升流, 盐度普遍高于

公海区域^[47], 这一定程度导致 SSS 对鳀 CPUE 的直接影响较小。

海平面高度能够反映涡流等中尺度特征, 正负海面高度异常值都与导致生态系统生产力提高的涡流有关^[7]。相关研究表明, SLA 与金枪鱼物种分布显著相关, 对鳀资源分布有显著影响^[7], 本研究表明, SLA 对毛塔海域鳀 CPUE 有显著正相关影响, 随 SLA 增加, 鳀 CPUE 增加。杨彩莉等^[48]发现, 鳀主要栖息于 SLA 正值区, 唐浩等^[9]和方舟等^[11]研究也表明中西太平洋海域鳀 CPUE 随着 SLA 增加呈上升趋势, 这与本研究结果基本一致, 因此在今后的生产作业中, 选择 SLA 正值区可能会提高渔具的可捕率。

溶解氧是鱼类新陈代谢等生命活动的重要因素^[2], 与其他金枪鱼相比, 鳀对溶解氧高度敏感, 且对环境氧气浓度的耐受性有限^[44]。作为高度洄游的鱼类, 鳀在水中游动需要消耗大量氧气, DO 水平的高低会限制鳀资源的分布^[34], Yang 等^[49]也指出较低的溶解氧会驱使鳀游向溶解氧较高的中上层。本研究发现 DO 对鳀 CPUE 的直接影响是显著正相关影响, 反映了鳀喜欢栖息于溶解氧较为丰富的区域, 这一定程度表明溶解氧高的区域鳀 CPUE 较高, 因此在今后渔业生产可选择溶解氧相对较高的区域。

叶绿素 a 浓度和鱼类栖息地之间的关系与生态系统的食物链息息相关, Chl-a 浓度能够反映所处位置浮游植物的数量, 浮游植物吸引了大量浮游动物, 因此饵料生物吸引大量鱼类聚集^[2]。Syah 等^[50]研究表明, 在一定范围内 Chl-a 浓度增加, 鳀的猎物数量增加, 从而吸引鳀大量分布在附近摄食, 因此 CPUE 增加。本研究结果表明, Chl-a 对鳀 CPUE 的直接影响为显著负相关影响, 即随着 Chl-a 浓度的增加, 鳀 CPUE 下降, 一方面这可能与鳀的摄食习性有关, 另一方面可能与研究渔场位于沿海和专属经济区内有关, Chl-a 浓度远高于公海区域, 较高的 Chl-a 浓度可能造成了水体富营养化, 对鳀鱼的生存产生负面影响。而 Vaiholala 等^[42]研究汤加专属经济区鳀发现, 随着 Chl-a 浓度增加, 鳀 CPUE 呈逐渐下降趋势, 这与本研究结

果一致。

3.2 环境因子对鲑 CPUE 的间接影响

SEM 的分析结果表明, 环境因子不仅对鲑 CPUE 产生直接影响, 而且还存在一定的间接影响。在间接影响中, SLA 和 DO 通过对 Chl-a 的影响从而间接对鲑 CPUE 产生较为显著的影响。本研究发现, SLA 对 Chl-a 产生负相关影响, 具体而言, 当 SLA 的值较高时, 海流呈现出明显的辐聚(水流汇聚)特征, 而当 SLA 的值较低时, 水流呈现出辐散的特征, 导致中心水体上升, 这有助于将富含营养盐的底层水带到表层水域^[51], 因此浮游生物大量繁殖, 有利于 Chl-a 浓度升高, 这与本研究结果一致。然而过高的 Chl-a 浓度, 可能导致水华等异常现象^[52], 产生有害物质不利于鱼类的生存, 故降低了 CPUE。DO 通过对 Chl-a 产生显著正向影响进而影响鲑 CPUE, 这可能是因为溶解氧较高的区域使得饵料生物大量繁殖, 提供了更多的营养物质和叶绿素^[53]。

SSS 通过对 DO 的影响而间接影响 CPUE, 研究表明 SSS 对 DO 呈显著正相关影响, Li 等^[54]探讨了海水中溶解氧通常与温度、盐度和水体富营养化有关, Liu 等^[55]分析表明 SSS 与 DO 存在显著正相关, 而鲑倾向于栖息在溶解氧较为丰富的表层水域, 这与 DO 对鲑 CPUE 呈显著正相关的影响一致。

SST 通过 SLA 等途径对鲑 CPUE 产生间接影响, 其中 SST 主要对 SLA 造成影响, 并最终作用于 CPUE。SST 与 SLA 之间呈显著正相关关系, 相关系数达到了 0.90, 反映了在全球气候变暖的趋势下, 毛塔海域的 SLA 与海表温度升高之间存在紧密关联, 因此海表温度的升高可能在一定程度上引起海平面的上升^[29]。Le 等^[56]研究指出 SST 和 SLA 之间总体呈现相关性的季节性变化, 这表明大气强迫的季节性变化以及底层上层海洋环流的相互作用是 SST 和 SLA 相关性的主要驱动因素。毛塔海域位于上升流区, 具有相应季节性变动, 这一定程度上解释了 SST 对 SLA 呈显著正相关的影响关系, 这一影响路径最终在季节性变动中对鲑鱼资源产生间接影响。

此外, SST 对 SSS 呈显著负相关影响, 通常处

于蒸发主导的地区盐度升高, 温暖的海表面温度会增加蒸发速率, 从而使海水中的盐度升高, 本研究发现 SST 和 SSS 呈负相关可能的原因是 SSS 受到淡水通量补充的影响^[57-58]。在毛塔地区, 7—9 月为雨季, 降水和沿岸径流所带来的淡水补充也会稀释和降低海表面盐度。然而 Yu 等^[59]研究发现当海区地表水的盐度降低时, 表层淡水的水平汇聚增加了上层的浮力, 使混合层变得较浅, 而低盐度增加的浮力则增强了 SLA, 进而产生了高 SST 与高 SLA 是一致的结果, 这解释了 SSS 和 SLA 呈负相关关系, 与本文研究结果相似。

关于 SST 和 DO 之间的关系, 本文研究结果揭示了 SST 对 DO 存在显著的负相关影响, 众多学者研究支持了这一结论^[29,60-61]。这种负相关关系主要由温度驱动的氧溶解度下降引起, 特别是在上层水域, 随着海洋变暖, 海气交换中获得的氧气减少, 从而导致溶解氧的减少。海洋鱼类对海水中溶解氧的可用性高度敏感^[44], 由于 DO 减少, 扩大了缺氧区的范围, 使该海域成为缺氧区域(一般 $DO \leq 2 \text{ mg/L}$)^[62], 大多数热带金枪鱼种类(例如鲑鱼和黄鳍金枪鱼)无法栖息在这些缺氧区, 它们的栖息地将会被限制在溶解氧更为丰富的表层, 因此增加了被渔具的捕获的可能性。

3.3 SEM 在渔业研究的适用性

气候变化等因素会影响海洋生态系统的众多生态过程, 环境变量也同样发生变化, 从而对物种丰度和分布产生直接或间接影响^[63]。在渔业资源研究中, 同样需要一种统计方法能够研究多种变量之间的相互关系及其对渔业 CPUE 的驱动机制。SEM 的优点在于能够将路径分析和多因素分析相结合, 量化多个变量间的直接和间接因果关系, 但目前在渔业领域中应用较少。MacDougall 等^[64]应用 SEM 研究鱼类群落的物种丰富度受环境变化和物种相互作用的调节, Boyce 等^[65]利用 SEM 分析大西洋鲱鱼种群时空变化的潜在驱动因素, Gu 等^[13]应用 SEM 研究分析了中国海水养殖贝类生态系统服务价值的驱动因素。

本研究首次基于 SEM 构建了 SST 等不同海洋环境因子对毛塔双拖鲑 CPUE 的影响路径及效应, 表明利用 SEM 揭示影响因素的相互关系和强

度从而更全面地了解对响应变量的潜在影响机制是可行的。研究表明,上述环境因子对鲣资源不仅存在显著的直接影响,还可以通过不同路径对其产生间接影响,这意味着鲣种群的分布和资源丰度在应对环境变动时可能存在复杂的机制,忽略环境因子之间的相互关系直接探索因子对种群影响的方法可能存在一定的局限性。这一综合考虑直接和间接影响的模型架构方法可为进一步探索环境因子对渔业资源变动机制提供新的思路和参考。

4 总结

本研究使用 2017—2019 年毛塔双拖鲣数据,采用 SEM 分析了 SST 等海洋环境因子与鲣 CPUE 的相关关系,探讨了鲣 CPUE 在多种环境因子影响下可能存在的潜在驱动因素。研究表明, SST 等环境因子是影响鲣 CPUE 的重要驱动因素,并且发现环境因子不仅对鲣的资源变动产生直接影响,还存在潜在的间接影响。这体现了环境因子对渔业资源复杂而多层次的影响机制,深入研究这些直接和间接的关联,有助于更全面地掌握环境变化对毛塔鲣渔业的影响。但由于数据的局限性,未来的研究中应考虑引入更多的观测变量以提高模型的解释力,以期进一步揭示鲣资源变化的驱动因素。这可为今后渔业资源评估和利用提供科学依据,深入研究海洋环境变化对渔业资源的影响提供理论依据。

参考文献:

- [1] FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022: 15-18.
- [2] Druon J N, Chassot E, Murua H, et al. Preferred feeding habitat of skipjack tuna in the eastern central Atlantic and western Indian Oceans: Relations with carrying capacity and vulnerability to purse seine fishing[C]//IOTC Proceedings. Seychelles: IOTC, 2016: 18-31.
- [3] Collette B B, Nauen C E. Scombrids of the world: An annotated and illustrated catalogue of tunas, mackerels, bonitos, and related species known to date. v. 2[M]. Rome: FAO Fish Finder-Synopses, 1983: 1-137.
- [4] Zhang K, Zhang J, Zhang P, et al. This is what we know: Assessing the stock status of the data-poor skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) fishery in the South China Sea[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1095411.
- [5] Prince J, Wang X, Lin K, et al. The CFRA: A joint assessment of South China Sea Skipjack Tuna Stocks[R]. Switzerland: Center for Humanitarian Dialogue, 2022.
- [6] Zainuddin M. Skipjack tuna in relation to sea surface temperature and chlorophyll-a concentration of bone bay using remotely sensed satellite data[J]. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 2011, 3(1): 82-90.
- [7] Lopez J, Moreno G, Lennert-Cody C, et al. Environmental preferences of tuna and non-tuna species associated with drifting fish aggregating devices (DFADs) in the Atlantic Ocean, ascertained through fishers' echo-sounder buoys[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2017, 140: 127-138.
- [8] Putri A, Zainuddin M. Application of remotely sensed satellite data to identify Skipjack Tuna distributions and abundance in the coastal waters of Bone Gulf[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 241(1): 012012.
- [9] Tang H, Xu L X, Chen X J, et al. Effects of spatiotemporal and environmental factors on the fishing ground of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in the Western and Central Pacific Ocean based on generalized additive model[J]. *Marine Environmental Science*, 2013, 32(4): 518-522. [唐浩, 许柳雄, 陈新军, 等. 基于 GAM 模型研究时空及环境因子对中西太平洋鲣鱼渔场的影响[J]. *海洋环境科学*, 2013, 32(4): 518-522.]
- [10] Wang W S, Tang W, Gong Y H, et al. Modeling habitat of skipjack tuna of free swimming school in Western and Central Pacific Ocean based on MaxEnt model[J]. *South China Fisheries Science*, 2023, 19(5): 11-21. [汪伟松, 唐未, 龚一赫, 等. 基于 MaxEnt 模型模拟中西太平洋鲣自由鱼群栖息地的研究[J]. *南方水产科学*, 2023, 19(5): 11-21.]
- [11] Fang Z, Chen Y Y, Chen X J, et al. Influence of environmental factors on the abundance of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in west-central Pacific Ocean determined using different models[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(5): 1123-1130. [方舟, 陈洋洋, 陈新军, 等. 基于不同模型研究环境因子对中西太平洋鲣资源丰度的影响[J]. *中国水产科学*, 2018, 25(5): 1123-1130.]
- [12] Martínez-Rincón R O, Ortega-García S, Vaca-Rodríguez J G. Comparative performance of generalized additive models and boosted regression trees for statistical modeling of incidental catch of wahoo (*Acanthocybium solandri*) in the Mexican tuna purse-seine fishery[J]. *Ecological Modelling*, 2012, 233: 20-25.
- [13] Gu Y X, Wang L F, Lyu S L, et al. Assessing potential driving factors of the ecosystem service value of mariculture shellfish in China using a structural equation modeling approach[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1232211.
- [14] Tull M, Metcalf S J, Gray H. The economic and social

- impacts of environmental change on fishing towns and coastal communities: A historical case study of Geraldton, Western Australia[J]. ICES Journal of Marine Science, 2016, 73(5): 1437-1446.
- [15] Zhang Z Y, Yang W, Ding J W, et al. Identifying changes in China's Bohai and Yellow Sea fisheries resources using a causality-based indicator framework, convergent cross-mapping, and structural equation modeling[J]. Environmental and Sustainability Indicators, 2022, 14: 100171.
- [16] Sirabella P, Giuliani A, Colosimo A, et al. Breaking down the climate effects on cod recruitment by principal component analysis and canonical correlation[J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, 216: 213-222.
- [17] Ottersen G, Stenseth N C. Atlantic climate governs oceanographic and ecological variability in the Barents Sea[J]. Limnology and Oceanography, 2001, 46(7): 1774-1780.
- [18] Shi Y F, Shi S H, Huang X M. The application of structural equation modeling in ecology based on R[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(5): 1015-1023. [石亚飞, 石善恒, 黄晓敏. 基于 R 的结构方程模型在生态学中的应用[J]. 生态学杂志, 2022, 41(5): 1015-1023.]
- [19] Grace J B. Structural equation modeling and natural systems[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 3-36.
- [20] Yang W, Li X X, Jin Y W, et al. The impact of multiple seashore reclamation activities on vegetation cover in the Yellow River Delta, China: Implications based on structural equation modeling[J]. Journal of Coastal Conservation, 2018, 22(2): 283-292.
- [21] Fan Y, Chen J Q, Shirkey G, et al. Applications of structural equation modeling (SEM) in ecological studies: An updated review[J]. Ecological Processes, 2016, 5(1): Article No.19.
- [22] Han B P, Fang H, Ruan W. Outline of marine fisheries in Mauritania[J]. Modern Fisheries Information, 2011, 26(4): 20-23. [韩保平, 方海, 阮雯. 毛里塔尼亚海洋渔业概况[J]. 现代渔业信息, 2011, 26(4): 20-23.]
- [23] Song L M, Xu H, Chen M R, et al. Relationship between spatiotemporal distribution of chub mackerel and marine environment variables in the waters near Mauritania[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(6): 868-877. [宋利明, 许回, 陈明锐, 等. 毛里塔尼亚海域日本鲭时空分布与海洋环境的关系[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(6): 868-877.]
- [24] Zhou A Z, Zhang X, Zhang Y, et al. Status and prospective on exploitation of demersal resources in sea area of Mauritania[J]. Modern Fisheries Information, 2011, 26(7): 3-6. [周爱忠, 张勋, 张禹, 等. 毛里塔尼亚海域底渔资源开发现状及前景分析[J]. 现代渔业信息, 2011, 26(7): 3-6.]
- [25] Wu L W, Zhang Y, Guo X, et al. Reduction of microbial diversity in grassland soil is driven by long-term climate warming[J]. Nature Microbiology, 2022, 7(7): 1054-1062.
- [26] Lan K W, Shimada T, Lee M A, et al. Using remote-sensing environmental and fishery data to map potential yellowfin tuna habitats in the tropical Pacific Ocean[J]. Remote Sensing, 2017, 9(5): 444.
- [27] Schmidt S, Stramma L, Visbeck M. Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades[J]. Nature, 2017, 542(7641): 335-339.
- [28] Kavak M T, Karadogan S. The relationship between sea surface temperature and chlorophyll concentration of phytoplanktons in the Black Sea using remote sensing techniques[J]. Journal of environmental biology, 2012, 33(2): 493.
- [29] Garcia-Soto C, Cheng L J, Caesar L, et al. An overview of ocean climate change indicators: Sea surface temperature, ocean heat content, ocean pH, dissolved oxygen concentration, arctic sea ice extent, thickness and volume, sea level and strength of the AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation)[J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 642372.
- [30] Zhang Y, Wang X H, Feng Z H, et al. Spatiotemporal pattern and influencing factors of thermal environment based on SEM model: A case study in Xi'an metropolitan area[J/OL]. Environmental Science, 2023: 1-19. (2023-09-22) [2023-12-01]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202307151>. [张颖, 王旭红, 冯子豪, 等. 基于 SEM 模型的热环境时空特征及影响因素分析: 以西安都市圈为例[J/OL]. 环境科学, 2023: 1-19. (2023-09-22) [2023-12-01]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202307151>.]
- [31] Spitale D, Petraglia A, Tomaselli M. Structural equation modelling detects unexpected differences between bryophyte and vascular plant richness along multiple environmental gradients[J]. Journal of Biogeography, 2009, 36(4): 745-755.
- [32] Curran P J, Bollen K A, Paxton P, et al. The noncentral Chi-square distribution in misspecified structural equation models: Finite sample results from a Monte Carlo simulation[J]. Multivariate Behavioral Research, 2002, 37(1): 1-36.
- [33] Yuan Z Y, Zheng X Q, Zhang L L, et al. Urban competitiveness measurement of Chinese cities based on a structural equation model[J]. Sustainability, 2017, 9(4): 666.
- [34] Brill R W. A review of temperature and oxygen tolerance studies of tunas pertinent to fisheries oceanography, movement models and stock assessments[J]. Fisheries Oceanography, 1994, 3(3): 204-216.
- [35] Kurita Y, Fujinami Y, Amano M. The effect of temperature on the duration of spawning markers—migratory-nucleus and hydrated oocytes and postovulatory follicles—in the multiple-batch spawner Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*)[J]. Fishery Bulletin, 2011, 109(1): 79-89.
- [36] Arenzon A, Lemos C A, Bohrer M B C. The influence of temperature on the embryonic development of the annual fish *Cynopoeilus melanotaenia* (Cyprinodontiformes, Rivulidae)[J]. Brazilian Journal of Biology, 2002, 62(4b): 743-747.
- [37] Réalis-Doyelle E, Pasquet A, de Charleroy D, et al. Strong effects of temperature on the early life stages of a cold stenothermal fish species, brown trout (*Salmo trutta* L.)(J). PLoS One, 2016, 11(5): e0155487.

- [38] Jobling M. The influences of feeding on the metabolic rate of fishes: A short review[J]. *Journal of Fish Biology*, 1981, 18(4): 385-400.
- [39] Jansen T, Gislason H. Temperature affects the timing of spawning and migration of North Sea mackerel[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(1): 64-72.
- [40] Freitas C, Villegas-Ríos D, Moland E, et al. Sea temperature effects on depth use and habitat selection in a marine fish community[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2021, 90(7): 1787-1800.
- [41] Feng H N, Lu H J, Wang J T. Spatial-temporal distribution of CPUE and its relation with environmental factors for skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) from purse-seine fishery in western and central Pacific Ocean[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2023, 43(1): 33-40. [冯虎年, 陆化杰, 汪金涛. 中西太平洋围网鲣鱼CPUE时空分布与环境因子关系[J]. *广东海洋大学学报*, 2023, 43(1): 33-40.]
- [42] Vaihola S, Yemane D, Kininmonth S. Spatiotemporal patterns in the distribution of albacore, bigeye, skipjack, and yellowfin tuna species within the exclusive economic zones of Tonga for the years 2002 to 2018[J]. *Diversity*, 2023, 15(10): 1091.
- [43] Sun J X. Analysis of bycatch status and countermeasures of Kiribati skipjack tuna purse-seine fishery by combining environmental factors[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022: 3-4. [孙健勋. 结合环境因子的基里巴斯鲣鱼围网渔场兼捕现状及对策分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022: 3-4.]
- [44] Mahadurage I G R. Environmental effect on the skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) fishery in the Sri Lankan waters[D]. Pukyong: Pukyong National University, 2016: 3-36.
- [45] Rougerie F, Chabanne J. Relationship between tuna and salinity in Tahitian coastal waters[J]. *Tropical Ocean-Atmosphere Newsletter*, 1983, 17: 12-13.
- [46] Yen K W, Wang G H, Lu H J. Evaluating habitat suitability and relative abundance of skipjack (*Katsuwonus pelamis*) in the Western and Central Pacific during various El Niño events[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 139: 153-160.
- [47] Fonteneau A, Meissa B, N'Gom F. On the changes of species composition of tuna catches in the Senegal-Mauritania area[J]. *Collective Volume of Scientific Papers. International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas*, 2017, 73(1): 244-269.
- [48] Yang C L, Yang X M, Zhu J F. Response of environmental factors to distribution of skipjack tuna purse seine fishery in Western and Central Pacific Ocean during different El Niña events[J]. *South China Fisheries Science*, 2021, 17(3): 8-18. [杨彩莉, 杨晓明, 朱江峰. 不同类型厄尔尼诺事件中环境因子对中西太平洋金枪鱼围网鲣分布响应[J]. *南方水产科学*, 2021, 17(3): 8-18.]
- [49] Yang S L, Yu L L, Wang F, et al. The environmental niche of the tuna purse seine fleet in the western and central Pacific Ocean based on different fisheries data[J]. *Fishes*, 2023, 8(2): Article No.78.
- [50] Syah A F, Ni'am A K, Jatisworo D. Potential fishing grounds of Skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in western water of Sumatera using remotely sensed data and maximum entropy model[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol: IOP Publishing, 2023: 012066.
- [51] Fan X M, Yang S L, Zhang S M, et al. Forecasting fishing ground of mackerel (*Scomber australasicus*) in Arabian Sea based on habitat suitability index[J]. *South China Fisheries Science*, 2020, 16(4): 8-17. [范秀梅, 杨胜龙, 张胜茂, 等. 基于栖息地指数的阿拉伯海鲈鱼渔情预报模型构建[J]. *南方水产科学*, 2020, 16(4): 8-17.]
- [52] Chauhan P, Nagur C R C, Mohan M, et al. Surface chlorophyll-a distribution in Arabian Sea and Bay of Bengal using IRS-P4 Ocean Colour Monitor satellite data[J]. *Current Science*, 2001, 80(2): 127-129.
- [53] Wallace J, Champagne P, Hall G. Time series relationships between chlorophyll-a, dissolved oxygen, and pH in three facultative wastewater stabilization ponds[J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2016, 2(6): 1032-1040.
- [54] Li G, Liu J X, Diao Z H, et al. Subsurface low dissolved oxygen occurred at fresh-and saline-water intersection of the Pearl River Estuary during the summer period[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 126: 585-591.
- [55] Liu G P, He W H, Cai S Q. Seasonal variation of dissolved oxygen in the Southeast of the Pearl River Estuary[J]. *Water*, 2020, 12(9): 2475.
- [56] Le Goff C, Fablet R, Tandeo P, et al. Spatio-temporal decomposition of satellite-derived SST-SSH fields: Links between surface data and ocean interior dynamics in the Agulhas region[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(11): 5106-5112.
- [57] Durack P J, Wijffels S E. Fifty-year trends in global ocean salinities and their relationship to broad-scale warming[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(16): 4342-4362.
- [58] Ba K, Ngom F, Tall S, et al. Movement patterns and size distribution of little tunny (*Euthynnus alletteratus*) in the Eastern Central Atlantic Ocean: Insights from conventional tag release-recapture data[J]. *Fisheries Research*, 2023, 266: 106761.
- [59] Yu L S, McPhaden M J. Ocean preconditioning of cyclone nargis in the Bay of Bengal: Interaction between Rossby waves, surface fresh waters, and sea surface temperatures[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2011, 41(9): 1741-1755.
- [60] Jewett L, Romanou A. Ocean acidification and other ocean changes. In: *Climate science special report: fourth national climate assessment, Volume 1*[R]. Washington DC: U.S. Global Change Research Program, 2017.
- [61] Iriarte A, Aravena G, Villate F, et al. Dissolved oxygen in contrasting estuaries of the Bay of Biscay: Effects of

- temperature, river discharge and chlorophyll A[J]. Marine Ecology Progress Series, 2010, 418: 57-71.
- [62] Stramma L, Prince E D, Schmidt S, et al. Expansion of oxygen minimum zones may reduce available habitat for tropical pelagic fishes[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(1): 33-37.
- [63] Lan K W, Wu Y L, Chen L C, et al. Effects of climate change in marine ecosystems based on the spatiotemporal age structure of top predators: A case study of bigeye tuna in the Pacific Ocean[J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 614594.
- [64] MacDougall A S, Harvey E, Mccune J L, et al. Context-dependent interactions and the regulation of species richness in freshwater fish[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 973-982.
- [65] Boyce D G, Petrie B, Frank K T. Fishing, predation, and temperature drive herring decline in a large marine ecosystem[J]. Ecology and Evolution, 2021, 11(24): 18136-18150.

Using structural equation modeling to investigate the influence of environmental factors on the CPUE of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) pair trawl fishery in Mauritania

ZHANG Honglin¹, MA Youcheng¹, SONG Houcheng¹, ZHANG Jian^{1, 2, 3, 4}, ZENG Zhijian⁵

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. National Engineering Research Centre for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai, 201306 China;
3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
4. Key Laboratory of Ocean Fisheries Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
5. Hongdong Fishery Co., Ltd. Fuzhou 350015, China

Abstract: Understanding the intricate relationship between fishery resource abundance and environmental factors is paramount for achieving sustainable fishery development and conservation goals. While previous studies have predominantly focused on the direct impacts of environmental factors on stock distribution and resource abundance, the underlying mechanisms remain poorly understood. To address this gap, we investigated the mechanisms through which various environmental factors and their interactions influence the abundance of skipjack tuna populations in Mauritanian waters. Utilizing catch per unit effort (CPUE) data spanning from 2017 to 2019, we employed structural equation modeling (SEM) to construct a comprehensive model assessing the direct and indirect influences of key environmental variables, including sea surface temperature (SST), sea surface salinity (SSS), sea level anomalies (SLA), dissolved oxygen (DO), and chlorophyll-a concentration (Chl-a), on skipjack tuna CPUE. Our findings demonstrate a well-fitting SEM model, revealing direct effects of SST, SSS, SLA, DO, and Chl-a on skipjack tuna CPUE. Notably, DO and SLA exhibited significant positive correlations with CPUE, while SST, SSS, and Chl-a displayed significant negative correlations. Furthermore, environmental factors such as SST exerted indirect effects on skipjack tuna CPUE through multiple pathways, shedding light on the potential impact mechanisms of SST and other environmental variables on skipjack tuna populations in Mauritanian waters.

Key words: *Katsuwonus pelamis*; pair trawl; CPUE; SEM; environmental factors; impact pathway

Corresponding author: ZHANG jian. E-mail: j-zhang@shou.edu.cn