

张畅, 陈新军. 不同时间尺度下智利竹筴鱼资源量与环境要素的关系[J]. 海洋学报, 2025, 47(1): 84–90. doi:10.12284/hyxb2025004
Zhang Chang, Chen Xinjun. The relationship between *Trachurus murphyi* and the environment at different time scales[J]. Haiyang Xuebao, 2025, 47(1): 84–90. doi:10.12284/hyxb2025004

不同时间尺度下智利竹筴鱼资源量与环境要素的关系

张畅¹, 陈新军^{2,3,4,5*}

(1. 浙江海洋大学 水产学院, 浙江 舟山 316022; 2. 上海海洋大学 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 上海海洋大学 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 5. 上海海洋大学 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306)

摘要: 智利竹筴鱼 (*Trachurus murphyi*) 资源量受环境影响明显, 而环境本身也会随时间的变化而变化, 存在短期的季节性变动和长期的模态变动。为更好地探究环境与渔业资源之间的关系, 本文基于 1970–2017 年智利竹筴鱼资源量与环境气候数据, 利用积分回归分析月间变化趋势, 利用模态分析和全子集回归分析, 从年间尺度分析了环境气候与智利竹筴鱼资源变动之间的联系。月间分析结果表明: 海表面温度对资源量的影响随季节变化最为明显, 尤其在产卵和越冬季节。其次为太平洋年代际涛动, 海表面盐度和厄尔尼诺指数的影响在不同月份变动幅度较小, 海表面高度产生的影响几乎不随月份改变。年间分析结果表明: 在长时间尺度上, 智利竹筴鱼资源变动存在 4 个模态变化时期, 每个模态中占据主导地位的影响因子组合存在区别, 尤其是随着近些年全球气候变化的加剧, 渔业资源可能受到了更多种环境要素的影响, 导致环境对渔业的影响模式发生了明显改变。

关键词: 智利竹筴鱼; 积分回归; 全子集回归; 模态变化; 环境

中图分类号: S931.1

文献标志码: A

文章编号: 0253–4193(2025)01–0084–07

1 引言

智利竹筴鱼 (*Trachurus murphyi*) 在东南太平洋的分布极其广泛, 东起智利、秘鲁和厄瓜多尔沿岸, 西至新西兰、澳大利亚沿海, 在 30°~60°S, 78°~177°W 的海域形成了密集的“竹筴鱼带”^[1]。从 19 世纪 70 年代至今, 数十个国家曾参与过智利竹筴鱼的捕捞, 历史最高产量达到 496 × 10⁴ t, 智利竹筴鱼无疑是东南太平洋极具经济价值的鱼类之一^[2]。在南太平洋区域渔业组织的评估中, 智利竹筴鱼资源连续多年呈现出良好状况^[3]。全球气候变化的大背景下, 环境气候变化对渔业资源的影响研究受到了越来越多的关注。国内外许多学者研究表明温度、盐度等环境因子不

仅会影响鱼类的个体生长^[4–5], 而且还会通过直接或间接影响鱼类的分布范围^[6–7]。海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 对智利竹筴鱼 CPUE 分布有着明显影响^[8]。此外, 全球性的气候变化, 由于影响区域广时间长, 对于海洋渔业资源也会有明显影响^[9–10]。例如, 太平洋年代际涛动 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 被认为是影响智利竹筴鱼渔获变动的重要因素之一^[11]。但目前的评估工作中, 尚未考虑环境气候变化对智利竹筴鱼的影响, 为更合理地开发智利竹筴鱼资源, 增强智利竹筴鱼的评估工作的气候适应性, 筛选合适的环境因子, 研究资源量与环境之间的关系是十分有必要的。

同时, 环境气候本身在不同的时间尺度下, 也存

收稿日期: 2024–07–03; 修订日期: 2024–11–29。

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFD2401302) 资助。

作者简介: 张畅 (1994—), 女, 浙江省金华市人, 讲师, 主要研究方向为渔业资源。E-mail: itschang@foxmail.com

* 通信作者: 陈新军, 教授, 主要研究方向为渔业资源、渔业生物学。E-mail: xjchen@shou.edu.cn

在不同的特性。在已有的研究中,往往假设环境要素对于某种渔业资源的影响是固定的,忽略了环境本身会随时间变化的特性。短期内(月间)环境要素会随季节变化而变化,例如海表面温度会随季节有明显的变化,对资源量产生的影响也可能发生变化。鱼类在不同的生活史阶段都会受到环境气候的影响,不同环境要素对资源影响的形式各有不同,影响的季节也存在区别^[12]。此外,从年际变化来看,长期环境气候变化会导致一个相对稳定的生态系统或资源状态,剧烈且突然地转变为另一个状态,即模态变动(regime shift)^[13-14]。模态变动可能会使得系统结构和功能发生重大变化,甚至可能导致渔业的崩溃^[15]。探究模态变动不仅有助于理解生态系统的动态变化,还能为制定有效的渔业管理策略提供科学依据,促进渔业资源的长期可持续利用^[16-17]。目前已有较多环境与资源的研究,但仍未有研究考虑不同时间尺度下环境本身的特性变化对智利竹筴鱼资源量的影响。本研究中将利用积分回归,以月为时间尺度进行环境要素对产量要素在不同生长季节的定量分析,该方法在农业中已有了大量的应用^[18-19]。同时,利用模态分析和全子集分析^[20],探究资源不同模态时期中影响资源变动的环境因子或环境因子的组合。从月、年两个时间尺度出发,根据环境本身的变化特性,研究环境对资源的影响,为更好地在全球气候背景下研究智利竹筴鱼资源变动提供理论基础。

2 材料与方法

2.1 数据来源

(1)资源量数据:1970-2017年智利竹筴鱼资源量数据源自南太平洋区域渔业管理组织(South Pacific Reginal Fisheries Management Organization, SPRFMO)评估报告^[21]。

(2)海洋环境数据:考虑智利竹筴鱼种群结构复杂,结合已有文献研究^[22-23],选取1970-2017年主要栖息海域(30°~45°S, 90°~70°W)的海表面温度、海表面盐度(Sea Surface Salinity, SSS)、海表面高度(Sea Surface Height, SSH)作为影响智利竹筴鱼资源量的潜在影响因子, SST数据来源于<https://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/erddap/griddap/index.html?page=1&itemsPerPage=1000>, SSH与SSS数据来源于http://apdrc.soest.hawaii.edu/las_ofes/v6/dataset?catitem=71。厄尔尼诺和拉尼娜现象对海洋渔业的影响极大^[24],选取Niño3.4区中1970-2017年厄尔尼诺指数(Oceanic Niño Index, ONI)的平均值,数据来源于美国国家大气局(网址:

<https://ggweather.com/ONI/oni.htm>)。太平洋年代际振荡指数可直接造成太平洋及周边地区气候的年代际变化,对中上层鱼类资源造成影响^[25],为此本研究中选取1970-2017的平均PDO,数据来源于<http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>。

2.2 积分回归

环境气候因素在鱼类整个生长发育期间都有影响,而环境因素本身又随着季节变动,逐月发生变化。为研究环境因子在不同时间(1年12个月份中)对资源量的影响,可以采用由Fisher提出的积分回归方法。积分回归的基本内容为利用正交多项式,将多个自变量转化为较少的自变量,再通过多元回归进行相关分析。

积分回归表达式:

$$y_i = c + \sum_{j=1}^p \int_0^{\tau} a_j(n) x_{ij}(n) dn + \epsilon_i, \quad (i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, p) \quad (1)$$

式中: i 和 j 分别代表样本和自变量,本次研究中总样本数 $N=48$,总自变量个数 $p=5$ 。 τ 表示生长发育期(1-12月), n 表示时间变量; $x_{ij}(n)$ 表示第 i 年第 j 个自变量; $a_j(n)$ 为积分回归系数,又称影响系数,专业含义为第 j 个因子在某时段于该时段平均数的基础上,每增加一个单位时间所引起的因变量的变化值。整个回归模型可以理解为:资源量 y_i 受到第 j 个随时间而变化的环境因子影响,而这种影响又随时间而变化。每个环境因子对资源量的影响是每个时刻的微效应在12个月份内的定积分,而所有环境因子的总效应又等于每个环境因子的效应之和。该分析在DPS系统中实现,具体计算过程可参考模型说明^[26]。

2.3 模态分析

环境气候变化会引起渔业资源的模态变动,连续 t 检验的模态变动分析(Sequential T-test Analysis of Regime Shifts, STARS)可用于检测智利竹筴鱼资源量的模态变动^[27]。通过模态跃变指数(Regime Shift Index, RSI)可反映出模态的改变。模态跃变指数计算公式为:

$$RSI_c = \sum_{i=c}^{c+m} \frac{x_i^*}{L\sigma_L}, \quad (m=0, \dots, L-1), \quad (2)$$

$$\text{diff} = \bar{X}_{\text{new}} - \bar{X}_{\text{cur}} = t \sqrt{\sigma_L^2/L}, \quad (3)$$

式中: c 为新模态的起始年份; m 为新模态中年份的数量; L 为所选取的截断长度; t 为置信水平 p 下, $2L-2$ 自由度的 t 分布值; σ_L^2 为方差;RSI是假定的新模态与旧模态的标准化偏差 x_i^* 之和, diff为两个连续模态平均值的差值,根据 t 检验(Student's t -test)判断其是

否具有统计学显著性,当存在显著性时确认新模式存在,当不存在显著性时RSI返回0值,并重新调整 L 值继续检测模态。根据相关文献和参数计算设定标准^[25-28],设置显著性检验置信水平 p 等于0.1,截断长度 L 等于20,Huber权重参数 H 等于2。

2.4 全子集回归

本次研究选用全子集回归法(all-subsets regression),在不同资源量模态下,筛选影响力最佳的环境因子组合,探讨不同时期环境因子的影响情况。 p 个环境因子可组成不同的 2^p 个组合,为有效选择最佳的环境因子组合,本次研究选用全子集回归。与传统的逐步回归筛选相比,全子集分析考虑了更多的预测变量组合情况,并且避免了人为筛选的主观性。全子集回归将所有可能的组合模型都考虑在内,综合评估不同影响因子的组合,筛选出最佳模型^[29]。本次研究使用R语言中leaps包实现,并以回归模型中的校准后 R^2 衡量组合精度,筛选出最佳组合。本次研究中变量因子包括SST、SSS、SSH、ONI和PDO,共5个变量,可构建 2^5 个回归组合,为方便探究环境因子对资源量的年间影响,选取5个环境因子的全年平均值进行全子集回归分析。

3 结果

3.1 月间变化

图1中的影响系数可理解为1970–2017年间各环境因子在不同月份引起资源量变动的的影响效应变化,本次分析的整体相关系数为 $R^2 = 0.8$, F 值为10.6, P 值小于0.001,该分析结果通过显著性检验。SST在1个月的单位时间内对资源变动的影响效应变化最大,影响系数大致呈现出两峰两谷的形态;其次为PDO,影响系数形态与SST相似,但是在时间上滞后;SSS和ONI对资源量的影响在不同月份波动较小,

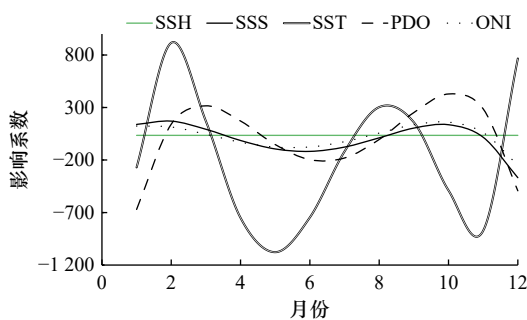


图1 1970–2017年各环境要素影响系数的逐月变化
Fig. 1 Monthly changes in the impact coefficients of the environmental factors from 1970 to 2017

SSH对资源量的影响几乎不随月份变动而改变。此外,各环境要素的影响系数在1–4月和10–12月内变化幅度比其他月份更大(图1)。

3.2 年间变动

3.2.1 模态变动

1970–2017年,智利竹筴鱼资源量发生了显著的年际变化,总体上呈现先上升再降低,再上升降低的连续波动过程,具体表现为资源量在1970–1988年处于波动上升阶段,且在1988年达到 $2\,309 \times 10^4$ t,为历史最高值,在随后的几年里其资源量持续下降,1998年后再次上升,于2001年达到第二个高峰值,随后资源量再次下降,2011年资源量为历史最低值(图2)。STARS分析结果表明,1970–2017年间智利竹筴鱼资源量可分为4个模态:第一模态为1970–1983年,该模态中资源量处于上升阶段,资源量平均水平相对较高;第二模态为1984–1993年,该模态中的资源量平均水平最高;第三模态为1994–2006年,该阶段资源量的起伏变化明显,但其平均值保持在较低的水平;第四模态为2007–2017年,该模态中的资源量平均水平最低(图2,图3)。

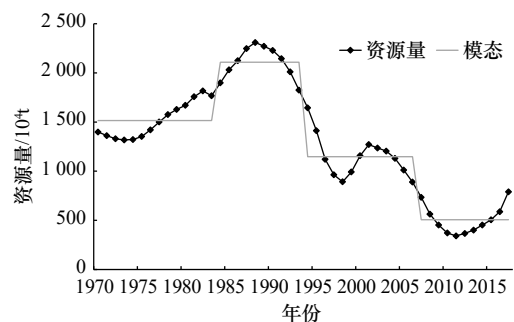


图2 1970–2017年智利竹筴鱼资源量模态检测
Fig. 2 Regime shift detection for Chilean jack mackerel biomass from 1970 to 2017

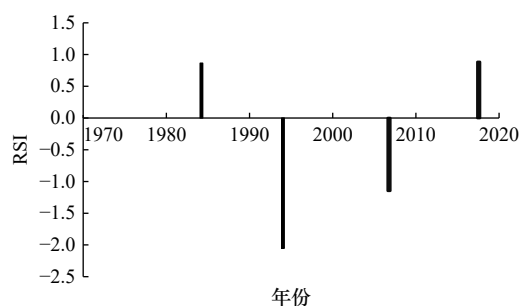


图3 1970–2017年智利竹筴鱼资源量跃变指数
Fig. 3 Regime shift index values of Chilean jack mackerel biomass from 1970 to 2017

3.2.2 环境因子的年间变动

表1为未区分模态下影响资源量变动的环境因

子组合,筛选并列出了排名前5个组合。仅考虑 SSH 和 SST 作为影响因子时,组合最优,当考虑所有的环境因子时,组合排名低于前者。表 2 为不同模态中的环境因子组合,第一模态中,最佳组合由 SSH、PDO 和 ONI 构成;第二模态中, SST、ONI 和 SSS 作为影响因子时,组合排名最靠前;第三模态中, SSH、PDO 和 ONI 的组合最佳;第四模态中,排名最靠前的组合为 PDO 和 ONI。表 3 为资源量与环境因子的回归模型,区分模态的模型 AIC 值都小于不区分模态的模型 AIC 值。结果表明,在不同时期,影响资源变动的环境因子不同,区分模态的回归模型明显优于不区分模态的回归模型。

表 1 1970–2017 年智利竹筴鱼资源量与环境因子的全子集分析

Table 1 All-subsets regression of Chilean jack mackerel resources and environmental factors from 1970 to 2017

非模态组合	包含的环境数据				
组合1	SSH	SST			
组合2	SSH	SST	SSS		
组合3	SSH	SST	PDO	SSS	
组合4	SSH	SST	ONI	PDO	SSS
组合5	SSH				

4 讨论

4.1 短时间尺度影响

南太平洋拥有丰富多样的非生物环境要素,这对智利竹筴鱼渔场的形成起着至关重要的影响^[30]。从月间(短时间尺度)结果分析,海表面温度的影响逐月呈明显的波动,两个波峰时间分别是 12 月至翌年 3 月(南半球的夏季)和 7–9 月份(南半球的冬季),该时间段分别位于智利竹筴鱼的产卵季节和越冬季节,表明该阶段对海表面温度升高对智利竹筴鱼资源量变动起正效应,较高的温度可能有利于智利竹筴鱼的繁殖活动。本研究结果与目前已有许多研究结果相符,都认为海表面温度对智利竹筴鱼有显著影响,且该影响具有明显的季节性^[8,31]。例如徐红云等^[32]研究认为南半球冬季海表面温度上升时,智利竹筴鱼适宜栖息地面积有增加的趋势,南半球秋季海表面温度上升时,智利竹筴鱼适宜栖息地面积有减小的趋势。本研究发现 SSS 对智利竹筴鱼产生负效应时期较多,这可能与智利竹筴鱼不喜高盐环境有关^[33],这一现象也可能在越冬产卵时期更为明显。SSH 变化对智利竹

表 2 第一、二、三、四模态下资源量与环境因子的全子集分析

Table 2 All-subsets regression of Chilean jack mackerel resources and environmental factors in the first, second, third, and fourth regime

模态	包含的环境数据					
第一模态	组合1	SSH	PDO	ONI		
	组合2	SSH	PDO	ONI	SSS	
	组合3		PDO	ONI		
	组合4	SSH	SST	PDO	ONI	SSS
	组合5				ONI	
第二模态	组合1		SST	ONI	SSS	
	组合2	SSH	SST			
	组合3	SSH				
	组合4	SSH	SST	ONI	SSS	
	组合5	SSH	SST	PDO	ONI	SSS
第三模态	组合1	SSH	PDO	ONI		
	组合2	SSH	PDO	ONI	SSS	
	组合3	SSH	SST	PDO	ONI	SSS
	组合4	SSH				
	组合5	SSH			ONI	
第四模态	组合1		PDO	ONI		
	组合2			ONI		
	组合3		SST	PDO	ONI	
	组合4		SST	PDO	ONI	SSS
	组合5	SSH	SST	PDO	ONI	SSS

表 3 各模态中的最佳模型及 AIC 值

Table 3 The best model and AIC value in each regime

	回归模型	AIC值
不区分模态	$\text{Ln}(\text{bio}) = 0.3 \times \text{SSH} - 0.6 \times \text{SST} + 14.9$	54.2
第一模态	$\text{Ln}(\text{bio}) = 0.03 \times \text{SSH} + 0.04 \times \text{PDO} + 0.07 \times \text{ONI} + 7.1$	-34.3
第二模态	$\text{Ln}(\text{bio}) = -7.4 \times \text{SSS} - 0.4 \times \text{SST} + 0.07 \times \text{ONI} + 252.8$	-20.8
第三模态	$\text{Ln}(\text{bio}) = 0.06 \times \text{SSH} + 0.1 \times \text{PDO} - 0.2 \times \text{ONI} + 6.7$	-3.7
第四模态	$\text{Ln}(\text{bio}) = -0.1 \times \text{PDO} + 0.2 \times \text{ONI} + 6.2$	6.2

筴鱼的影响不随着季节改变而改变,可能因为 SSH 对智利竹筴鱼产生的影响是常年存在的,例如通过 SSH 影响高初级生产力区域的聚集,影响摄食索饵等常年存在的行为。PDO 和厄尔尼诺的影响随季节变动也有变化,但全球性气候变化通常持续时间较长,

更适合年间或年际的长时间序列分析。

多个环境要素的影响系数在 1-4 月和 10-12 月内变化幅度较大,可能原因为 10 月至翌年的 3 月份是智利竹筴鱼的产卵时间,该阶段可能更容易受到环境气候影响。在以往资源量与环境关系的研究中,所有环境气候因子通常选取同样的时间周期(全年或者某几个月份的平均),但不同环境因子的影响随着时间变化而变动的程度不同,不同时间周期的选择可能会带来完全不同的结果。如何合理选取环境因子的时间周期,充分表达环境因子对资源量影响信息,这些都值得在今后研究中进一步探究。

4.2 长时间尺度影响

在传统研究中,数十年的资源变动由固定的一种或几种环境因子影响,这可能会过度强调某些环境因子的作用。在本研究中,对比不考虑模态变动与考虑模态变动的结果,两者存在明显不同,但通过 AIC 值的比较,也认为考虑模态变动的结果更为可靠。

与短期时间尺度结果相比,在长时间尺度分析中 PDO 和 ONI 气候因子频繁出现在多个模态中,不仅是其影响范围广、影响时间较长,而且 PDO 和 ONI 本身也存在周期性的变化^[34],厄尔尼诺现象也会导致智利竹筴鱼的分布在持续的 3~4 a 间发生改变^[35-36]。4 个模态间比较,最佳模型的 AIC 值有明显下降,说明在第三、四模态下,可能是其他的要素占据了主导地位,导致环境对渔业的影响模式发生了改变。近些年来,全球气候变化加剧对全球渔业生产力造成的深远影响,使得渔业对环境气候变化的响应更为复杂^[37]。探究更多的环境因子的影响,有助于了解其内在机制,但过多的影响因子可能导致模型筛选和拟合的效率较低^[38]。

4.3 展望

尽管环境与资源变动的研究已取得了较大进展,

但并未广泛地被应用于资源评估管理中,很大一部分原因是环境气候本身及其产生的影响都随时间变化而变化,如何能作为一个有效的数据源放入资源分析中,仍值得不断探索研究^[39]。长远来看该领域研究仍存在很大的发展空间,建议今后研究可从以下几个方面展开:(1)多元化的数据与方法。海洋中环境因子众多,但有的环境因子难以监测或者还未被目前的研究所关注到,今后因探索更多的环境因子,多元的环境数据有利于信息的多样化,随着学科交叉的深入和日益丰富的环境数据,具有更多功能的模型会有更大的发挥空间;(2)跨学科交流。各分析方法虽然能从数理方面了解资源与环境的关系,但其内在的机理,例如环境气候变化通过哪些不同生理形式(生长、繁殖等)对渔业资源产生影响,仍然需要更多科学的解释,才能更高效地为资源评估与管理提供理论基础;(3)增加资源评估的气候适应性。全球气候变化下,将环境引入渔业资源评估管理工作中一直是研究热点之一,但是存在诸多困难,例如引入哪些环境因子或如何引入环境因子,同时,环境本身在不同时间尺度上也存在不同的特性。在今后的评估工作中不仅要筛选合适的环境因子,还应考虑不同的时间阶段中环境的变动,完善评估管理工作,从而使得渔业在面临气候变化时有更好的适应性。

环境本身存在季节性变动和模态变动,对渔业的影响形式、影响的阶段又存在不同。因此本文从月、年两种时间尺度出发,分析环境与智利竹筴鱼资源量之间的关系。此外,环境气候变化对生态系统的影响存在滞后效应^[40],人类捕捞对渔业资源也有着重要影响^[41],生物因素(捕食-被捕食、竞争等)^[42]也是引起资源变动的要素之一,在今后的研究中,可结合多重影响要素分析渔业资源内在的变化机制。

参考文献:

- [1] 张敏,邹晓荣,季星辉,等. 东南太平洋公海水域智利竹筴鱼探捕及其商业开发前景探讨[J]. 水产学报, 2005, 29(3): 386-391. Zhang Min, Zou Xiaorong, Ji Xinghui, et al. Discussion on exploratory fishing of Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) in the open sea of the southeast Pacific and prospect of its commercial exploitation[J]. Journal of Fisheries of China, 2005, 29(3): 386-391.
- [2] SPRFMO. South Pacific Regional Fisheries Management Organisation. 7th scientific committee meeting report[R]. Havana: SPRFMO, 2019.
- [3] SPRFMO. South Pacific Regional Fisheries Management Organisation. 11th scientific committee meeting report[R]. Panama City: SPRFMO, 2023.
- [4] Yin Fei, Peng Shiming, Sun Peng, et al. Effects of low salinity on antioxidant enzymes activities in kidney and muscle of juvenile silver pomfret *Pampus argenteus*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1): 55-60.
- [5] 张晨捷,施兆鸿,王建钢,等. 盐度影响海水硬骨鱼类渗透压调节机理的研究与展望[J]. *海洋渔业*, 2013, 35(1): 108-116. Zhang Chenjie, Shi Zhaohong, Wang Jiangang, et al. On salinity-related effects on osmoregulation mechanism in marine teleost[J]. *Marine Fisheries*, 2013, 35(1): 108-116.
- [6] Nakata H, Kimura S, Okazaki Y, et al. Implications of meso-scale eddies caused by frontal disturbances of the Kuroshio Current for an-

- chovy recruitment[J]. *Ices Journal of Marine Science*, 2000, 57(1): 143–152.
- [7] 牛明香, 李显森, 徐玉成. 智利外海竹筴鱼中心渔场时空变动的初步研究[J]. *海洋科学*, 2009, 33(11): 105–109.
Niu Mingxiang, Li Xiansen, Xu Yucheng. Preliminary study on spatio-temporal change of central fishing ground of Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) in the offshore waters of Chile[J]. *Marine Sciences*, 2009, 33(11): 105–109.
- [8] Zhang H, Zhang Shengmao, Cui X S, et al. Spatio-temporal dynamics in the location of the fishing grounds and catch per unit effort (CPUE) for Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi* Nichols, 1920) from Chinese trawl fleets on the high seas of the Southeast Pacific Ocean, 2001–2010[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2015, 31(4): 646–656.
- [9] Hare S R, Mantua N J, Francis R C. Inverse production regimes: Alaska and West Coast Pacific Salmon[J]. *Fisheries*, 1999, 24(1): 6–14.
- [10] Shanks A L. Atmospheric forcing drives recruitment variation in the Dungeness crab (*Cancer magister*), revisited[J]. *Fisheries Oceanography*, 2013, 22(4): 263–272.
- [11] 肖启华, 黄硕琳. 气候变化对东南太平洋智利竹筴鱼渔获量的影响[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(8): 1020–1029.
Xiao Qihua, Huang Shuolin. Impact of climate change on Chilean jack mackerel catch in the southeast Pacific[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(8): 1020–1029.
- [12] Tian Yongjun, Akamine T, Suda M. Modeling the influence of oceanic-climatic changes on the dynamics of Pacific saury in the northwestern Pacific using a life cycle model[J]. *Fisheries Oceanography*, 2004, 13(S1): 125–137.
- [13] Folke C, Carpenter S, Walker B, et al. Regime Shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2004, 35: 557–581.
- [14] Hare S R, Mantua N J. Empirical evidence for north Pacific regime shifts in 1977 and 1989[J]. *Progress in Oceanography*, 2000, 47(2/4): 103–145.
- [15] Steele J H. Regime shifts in fisheries management[J]. *Fisheries Research*, 1996, 25(1): 19–23.
- [16] Scheffer M, Carpenter S R. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2003, 18(12): 648–656.
- [17] Peterson, William T. A new climate regime in northeast Pacific ecosystems[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(17): 307–336.
- [18] 朱海霞, 李东明, 王铭, 等. 基于积分回归法黑龙江省作物产量动态预报研究[J]. *气象与环境学报*, 2018, 34(3): 86–92.
Zhu Haixia, Li Dongming, Wang Ming, et al. Research on crop yield dynamic forecast based on Integration Regression Method in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2018, 34(3): 86–92.
- [19] 贾建英, 刘一锋, 彭妮, 等. 基于积分回归法甘肃省冬小麦产量动态预报[J]. *气象与环境学报*, 2016, 32(2): 100–105.
Jia Jianying, Liu Yifeng, Peng Ni, et al. Dynamic forecast of winter wheat yield based on an integral regression method in Gansu Province[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2016, 32(2): 100–105.
- [20] 张智韬, 韩佳, 王新涛, 等. 基于全子集-分位数回归的土壤含盐量反演研究[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(10): 142–152.
Zhang Zhitao, Han Jia, Wang Xintao, et al. Soil salinity inversion based on best subsets-quantile regression model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(10): 142–152.
- [21] SPRFMO. South Pacific Regional Fisheries Management Organisation. 6th scientific committee meeting report[R]. Puerto Varas: SPRFMO, 2018.
- [22] Hintzen N T, Corten A, Gerlotto F, et al. Hydrography and Jack mackerel stock in the South Pacific[R]. Ijmuiden: IMARES, 2013.
- [23] Cubillos L A, Paramo J, Ruiz P, et al. The spatial structure of the oceanic spawning of jack mackerel (*Trachurus murphyi*) off central Chile (1998–2001)[J]. *Fisheries Research*, 2008, 90(1–3): 261–270.
- [24] Gierach M M, Lee T, Turk D, et al. Biological response to the 1997–98 and 2009–10 El Niño events in the equatorial Pacific Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(10): L10602.
- [25] 吕俊梅, 琚建华, 张庆云, 等. 太平洋海温场两种不同时间尺度气候模态的分析[J]. *海洋学报*, 2005, 27(5): 30–37.
Lü Junmei, Ju Jianhua, Zhang Qingyun, et al. The analysis of two climate patterns on different time scales in Pacific sea temperature fields[J]. *Haiyang Xuebao*, 2005, 27(5): 30–37.
- [26] 唐启义, 唐睿. DPS 数据处理系统-第二卷 现代统计及数据挖掘[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 558–564.
Tang Qiyi, Tang Rui. DPS Data Processing System-Volume 2 Contemporary Statistics and Data Mining[M]. Beijing: Science Press, 2020: 558–564.
- [27] Rodionov S, Overland J E. Application of a sequential regime shift detection method to the Bering Sea ecosystem[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2005, 62(3): 328–332.
- [28] 张畅, 李纲, 陈新军. 不同模态下气候变化对智利竹筴鱼补充量的影响[J]. *海洋学报*, 2021, 43(9): 48–58.
Zhang Chang, Li Gang, Chen Xinjun. Impact of climate change on recruitment of *Trachurus murphyi* based on different regimes[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(9): 48–58.
- [29] Lawless J F, Singhal K. ISMOD: an all-subsets regression program for generalized linear models. I. Statistical and computational background[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 1987, 24(2): 117–124.
- [30] 张畅, 李纲, 陈新军. 南太平洋智利竹筴鱼渔业生物学与评估管理研究进展[J]. *海洋湖沼通报*, 2023, 45(6): 161–170.
Zhang Chang, Li Gang, Chen Xinjun. Proceedings of fisheries biology and assessment of Jack mackerel (*Trachurus murphyi*) inhabiting South Pacific[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2023, 45(6): 161–170.
- [31] Bertrand A, Habasque J, Hattab T, et al. 3-D habitat suitability of jack mackerel *Trachurus murphyi* in the Southeastern Pacific, a comprehensive study[J]. *Progress in Oceanography*, 2016, 146: 199–211.
- [32] 徐红云, 汪金涛, 陈新军, 等. 海表水温变化对东南太平洋智利竹筴鱼栖息地分布的影响[J]. *海洋渔业*, 2016, 38(4): 337–347.

- Xu Hongyun, Wang Jintao, Chen Xinjun, et al. Influence of sea surface temperature changes on Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) habitat in the Southeast Pacific[J]. *Marine Fisheries*, 2016, 38(4): 337–347.
- [33] 陈春光. 东南太平洋智利竹筴鱼渔场空间分布及其栖息地适宜性指数的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- Chen Chunguang. Study on fishing ground spatial distribution and habitat suitability index (HSI) model of Chilean Jack Mackerel (*Trachurus murphyi*) in the Southeast Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [34] Fiedler P C. Environmental change in the eastern tropical Pacific Ocean: review of ENSO and decadal variability[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 244: 265–283.
- [35] Arcos D F, Cubillos L A, Núñez S P. The jack mackerel fishery and El Niño 1997–98 effects off Chile[J]. *Progress in Oceanography*, 2001, 49(1/4): 597–617.
- [36] Luo Jingjia, Yamagata T. Long-term El Niño-Southern Oscillation (ENSO)-like variation with special emphasis on the south Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, 106(C10): 22211–22227.
- [37] Doney S C, Ruckelshaus M, Duffy J E, et al. Climate change impacts on marine ecosystems[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2012, 4: 11–37.
- [38] Hofmann M, Gatu C, Kontoghiorghes E J. Efficient algorithms for computing the best subset regression models for large-scale problems[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2007, 52(1): 16–29.
- [39] Ianelli J N, Hollowed A B, Haynie A C, et al. Evaluating management strategies for eastern Bering Sea walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in a changing environment[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2011, 68(6): 1297–1304.
- [40] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate change 2014-impacts, adaptation, and vulnerability: part A: global and sectoral aspects[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [41] Rousseau Y, Watson R A, Blanchard J L, et al. Evolution of global marine fishing fleets and the response of fished resources[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(25): 12238–12243.
- [42] Harley C D G, Hughes A R, Hultgren K M, et al. The impacts of climate change in coastal marine systems.[J]. *Ecology Letters*, 2010, 9(2): 228–241.

The relationship between *Trachurus murphyi* and the environment at different time scales

Zhang Chang¹, Chen Xinjun^{2,3,4,5}

(1. School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. College of Marine Living Resource Sciences and Management, 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. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 5. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploitation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The *Trachurus murphyi* is affected by the environment, and the environment itself changes with time, with short-term seasonal changes and long-term regime shifts. Based on the data on jack mackerel stock and the environment from 1970 to 2017, this paper analyzes the relationship between the environment and jack mackerel stock from month to year using integral regression, regime shifts analysis, and all-subsets regression analysis. The month-on-month analysis results show that the influence of Sea Surface Temperature (SST) on stock biomass changes most obviously with time. Chilean jack mackerel is more dependent on SST in spawning and overwintering seasons. Followed by the Pacific Decadal Oscillation (PDO), the effects of Sea Surface Salinity (SSS) and Oceanic Niño Index (ONI) vary less in different months. The impact of Sea Surface Height (SSH) hardly changes from month to month. The annual analysis revealed four distinct regime shifts in Chilean mackerel resources over a long-time scale, with each regime characterized by unique dominant factor combinations. Notably, with the escalation of global climate change in recent years, a broader array of environmental factors has potentially influenced fishery resources, leading to significant changes in the patterns of environmental impact on fisheries.

Key words: Chilean jack mackerel; integral regression; full subset regression; regime shift; environment