

文章编号: 1674-5566(2024)01-0211-19

DOI: 10.12024/jsou.20230304131

## 气候变化对西南大西洋渔业生态系统的影响研究进展

余 为<sup>1,2,3,4,5</sup>, 刘赫威<sup>1</sup>, 陈新军<sup>1,2,3,4,5</sup>

(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 201306; 3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306; 5. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306)

**摘 要:** 西南大西洋是世界重要的渔区, 捕捞国家包括阿根廷等西南大西洋沿海国以及中国、日本等众多非沿海国家。阿根廷滑柔鱼(*Illex argentinus*)、阿根廷无须鳕(*Merluccius hubbsi*)、巴西小沙丁鱼(*Sardinella brasiliensis*)与弗氏绒须石首鱼(*Micropogonias furnieri*)是西南大西洋年产量最高的4种主要经济渔获物。探究气候变化对西南大西洋生态系统的影响有利于建立基于生态系统的渔业资源保护与利用对策。本文从渔业资源与生态系统两个角度出发, 分别归纳了生态系统的生物因子(主要经济渔获物)、非生物因子(环境因素)与营养结构(食物链和食物网)对气候变化的响应情况。总结发现, 气候变化会影响环境的变化, 并对生态系统的渔业资源及营养结构产生影响。分析认为, 在今后探究西南大西洋生态系统对气候变化响应的研究中, 选取代表物种表征生态系统的变化, 并结合人类活动与气候变化的影响可以丰富生态系统研究的相关结论, 为西南大西洋提供基于生态系统的科学管理策略。

**关键词:** 西南大西洋; 渔业生态系统; 气候变化; 经济渔获物; 食物网

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

西南大西洋是世界重要的渔业捕捞区域, 其与南美洲南部相连的大陆架与大陆坡区域是世界海洋中初级生产力最高的海域之一<sup>[1-2]</sup>。在联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization, FAO)的渔区划分中, 西南大西洋为41渔区, 主要位于巴西北部5°N和阿根廷南部60°S之间, 覆盖了南美洲东海岸外1 765万km<sup>2</sup>的海洋面积, 其中包括196万km<sup>2</sup>的陆架面积<sup>[3]</sup>。根据FAO统计, 1950—2018年, 41渔区最主要的渔获物为阿根廷滑柔鱼(*Illex argentinus*)、阿根廷无须鳕(*Merluccius hubbsi*)、巴西小沙丁鱼(*Sardinella brasiliensis*)与弗氏绒须石首鱼(*Micropogonias furnieri*)等。其中阿根廷滑柔鱼是我国远洋鱿钓渔业的主要渔获物之一, 自1997年大规模商业开发以来, 最高产量达47万t<sup>[3]</sup>。

气候(Climat)是缓慢变化的大气-海洋-陆地系统组成成分, 其统计特征表现为温度、降水

及风等环境要素的长期均值及变化(在此所指长期约为30年)<sup>[4]</sup>。环境与气候变化可以通过改变海洋水体的温度和盐度及温盐环流模式, 进而改变局部或区域尺度上的生态系统结构与功能<sup>[5-6]</sup>。气候变化可能会导致群落在时间和空间上的重组, 群落重组是气候变化对生态系统造成的最主要后果之一<sup>[7]</sup>。群落重组可能会使生态系统的营养失衡, 并进一步导致食物关系的改变<sup>[8-9]</sup>。气候变化不仅是生态系统发生大规模突变的重要诱因之一, 并会加剧生态系统发生突变的频率<sup>[10]</sup>。

本文将从西南大西洋的渔业资源出发, 探究其与所在的生态系统对环境及气候变化的响应情况, 以期从生态系统角度建立科学的海洋渔业资源评价指标体系, 推动形成基于生态系统的捕捞强度与渔业资源相协调的生物资源利用与养护格局。

收稿日期: 2023-03-30

修回日期: 2023-05-04

基金项目: 上海市自然科学基金(23ZR1427100); 上海市人才发展资金(2021078); 国家自然科学基金(41906073)

作者简介: 余 为(1989—), 男, 副研究员, 研究方向为渔业海洋学。E-mail: wyu@shou.edu.cn

通信作者: 陈新军, E-mail: xjchen@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.shhydx.com

# 1 西南大西洋生态系统概述

## 1.1 西南大西洋海洋环境概况

西南大西洋海洋环境复杂,在南美洲拉普拉塔河(La Plata river)入海口处,来自北方的巴西暖流(Brazil current, BC)与来自南方的马尔维纳斯寒流(Malvinas current, MC)在该海域交汇,在河流入海口处形成三流交汇区(图1)。马尔维纳斯寒流是大西洋经向翻转环流的重要组成部分<sup>[11]</sup>,是南极绕极流(Antarctic circumpolar current, ACC)的分支,其水体大部分来自南极绕极流。南极绕极流是由盛行西风驱动,绕南极大陆一周的东向环流,是全球洋流系统的重要组成部分。马尔维纳斯寒流是流速较大,狭长的正压海流,分为两条支流:

东支流经大陆斜坡流向马尔维纳斯群岛东部;西支有时被称为巴塔哥尼亚洋流<sup>[12]</sup>,在100~200 m等深线之间流过大陆架,把亚南极的富营养冷水向北传送,并在38°S附近遇到巴西暖流后改变方向,由从南向北改为从西北至东南,成为大西洋副热带大涡的一部分。巴西暖流源于南赤道洋流(South equatorial current, SEC)的一个分支<sup>[13]</sup>,属于风生流分类中的西边界流,表现出高的中尺度变化,弯曲和反气旋涡旋间歇形成<sup>[14-15]</sup>,它与马尔维纳斯寒流相遇后改为东向的海流,与非洲西海岸的本格拉海流、南赤道流共同组成了大西洋副热带大涡<sup>[16]</sup>。马尔维纳斯寒流和巴西暖流交汇而产生的复杂多变的海洋结构是西南大西洋形成高生产力渔区的重要因素之一。

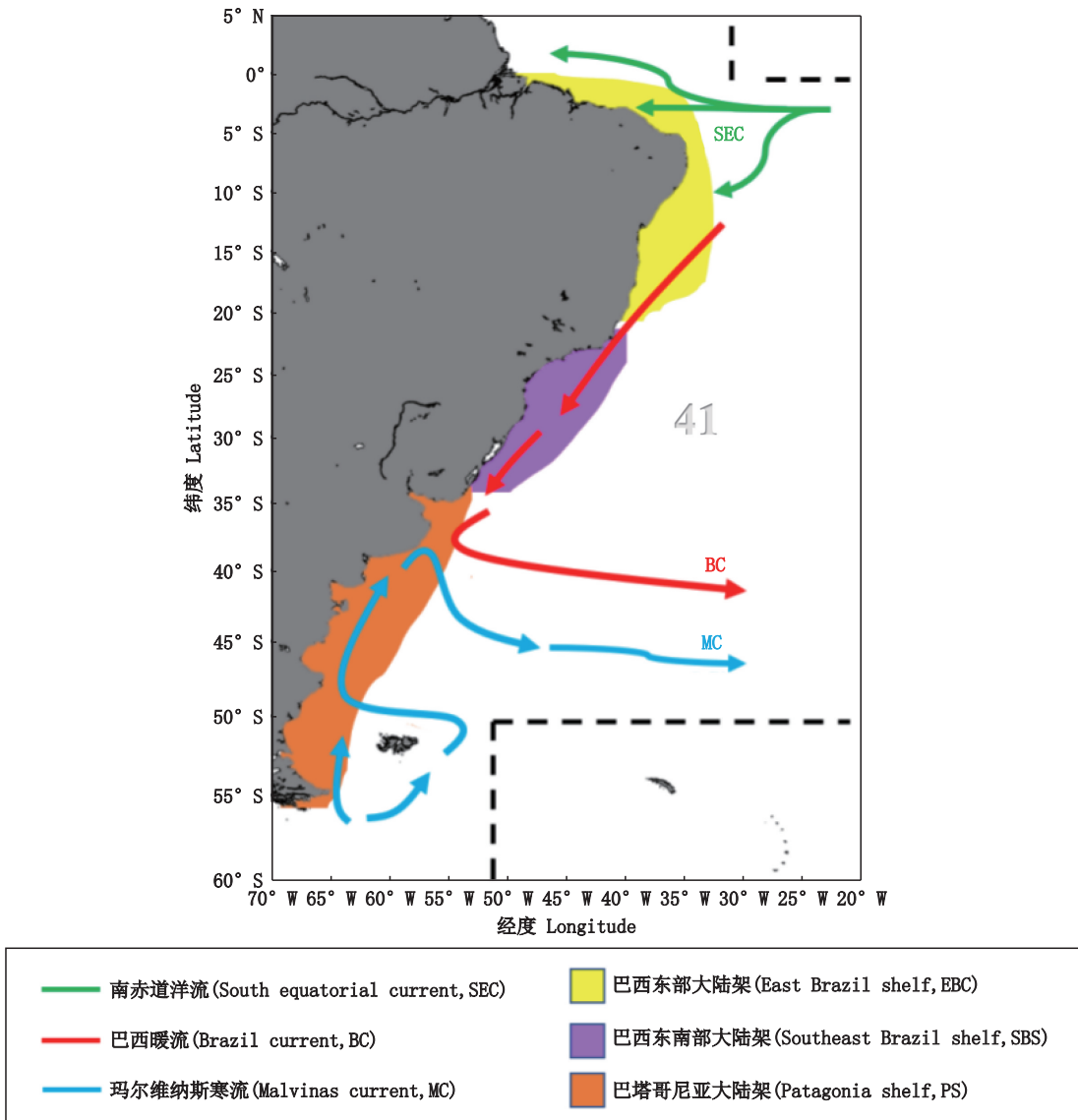


图1 西南大西洋41渔区海洋概况与3个大海洋生态系统分布位置

Fig. 1 Marine profile and three LMEs distribution of fishing area 41 in the Southwest Atlantic Ocean

自 1984 年来,大海洋生态系统(Large marine ecosystem, LME)常被作为基本单位来探究海洋生态系统的生产力、渔业资源与社会经济等变化<sup>[17-19]</sup>。据统计,世界上渔业捕捞产量 80% 以上来自 66 个大海洋生态系统<sup>[19]</sup>,西南大西洋的渔业产量也以大海洋生态系统内为主,但离岸较远的公海区域也有阿根廷滑柔鱼等渔业捕捞作业。西南大西洋共包括巴西东部大陆架(East Brazil shelf, EBS)、巴西南部大陆架(South Brazil shelf, SBS)和巴塔哥尼亚大陆架(Patagonian shelf, PS)等 3 个大海洋生态系统。这 3 个大海洋生态系统的渔业产量与初级生产力从高到低排序依次为巴塔哥尼亚大陆架、巴西南部大陆架、巴西东部大陆架<sup>[20]</sup>。本文基于这 3 个大海洋生态系统对西南大西洋生态系统的海洋环境进行概述。

### 1.1.1 巴西东部大陆架(约 0°S~22°S)

受西边界流影响,巴西东部大陆架是世界上生产力最低的热带大陆架之一<sup>[21]</sup>。巴西东部大陆架较为狭窄,缺少海湾,为典型的开放型海域,位于贫营养的南赤道洋流的路径上,大陆径流相对较少,几乎完全被生物碳酸盐沉积物覆盖<sup>[22]</sup>。在巴西东部大陆架南部,靠近巴西南部大陆架的位置,生物多样性增加,渔业资源丰度提高,这是由于大陆径流的增加以及扩张的堡礁陆架形成了向西南流动的巴西暖流地形屏障,这种特殊的地形特征会导致陆架边缘涡旋和上升流的形成<sup>[23-24]</sup>。在阿布洛霍斯海岸(Abrolhos bank)附近的阿布洛霍斯-坎波斯地区(Abrolhos-Campos region, ACR), 15°S~23°S 海域<sup>[24]</sup>,沿东部大陆架边缘产生涡旋<sup>[25]</sup>,阿布洛霍斯-坎波斯地区的初级生产力受河流、陆架边缘上升流、对陆架产生冲击的涡旋三者共同影响<sup>[26]</sup>。

对巴西东部大陆架影响最大的南赤道洋流的 3 个分支在 7°S~17°S 之间撞击海岸<sup>[27]</sup>,在大约 10°S 处形成向西北流动的北巴西洋流(North Brazil current, NBC)<sup>[28]</sup>和向东南流动的巴西暖流<sup>[29]</sup>。其中巴西暖流对巴西南部大陆架影响较大<sup>[30]</sup>。

### 1.1.2 巴西南部大陆架(约 23°S~35°S)

巴西南部大陆架的海洋环境主要受沿大陆架向南的巴西暖流影响,但由于在巴西南部大陆架 38°S 附近,来自热带的巴西暖流与来自亚寒带的马尔维纳斯寒流交汇,且在有些年份的冬季(6—9月),马尔维纳斯寒流可以向北运动到 23°S

并将交汇的水团输送到巴西南部大陆架<sup>[31]</sup>,因此巴西南部大陆架水域的水团较为复杂。巴西南部大陆架区域共有 6 个主要水团,包括由温跃层水(Thermocline water, TLW)、亚南极表层水(Subantarctic surface water, SSW)、南极中间水(Antarctic intermediate water, AIW)、上环极深水(Upper circumpolar deep water, UCDW)、北大西洋深水(North Atlantic deep water, NADW)、下环极深(Lower circumpolar deep water, LCDW)、威德尔海深水(Weddell Sea deep water, WSDW)等 7 种来自不同地理区域的不同深层水源<sup>[32]</sup>混合形成的南大西洋中央水(South Atlantic central water, SACW)<sup>[33]</sup>、亚热带大陆架水(Subtropical shelf water, STSW)、大陆架水(Shelf water, SW)、热带水(Tropical water, TW)、普拉塔羽流水(Plata plume water, PPW)和亚南极大陆架水(Subantarctic shelf water, SASW)<sup>[34]</sup>。组成的最为复杂且营养丰富的南大西洋中央水存在于整个巴西南部大陆架的底部(深度约 50 m)<sup>[31]</sup>。在巴西南部大陆架的北部,存在强烈的次表层上升流(深度约 20 m);在巴西南部大陆架中部,南大西洋中央水与表层海水的温差为 10 °C,水体热分层明显,温跃层强度较高,下层具有丰富营养盐的冷水很难到达海洋表层<sup>[35]</sup>。在夏季,巴西南部大陆架的水体被温跃层分为上下两层,上层以大陆架水与亚热带大陆架水或大陆架水与热带水的混合水体为主;下层为南大西洋中央水<sup>[36]</sup>。秋季南大西洋中央水出现在水深 30 m 左右,且温度比夏季高;在晚秋,陆架上等温线与等盐线的结构主要受由巴塔哥尼亚大陆架向北流动的低温低盐的亚南极大陆架水影响<sup>[37]</sup>。在冬季,亚南极大陆架水强度增加,向北流动到巴西乌巴图巴(Ubatuba);热带水向南流经大陆坡,且在巴西南部大陆架南部移动到近海<sup>[35]</sup>。普拉塔羽流水与亚南极大陆架水相同,也是寒冷且营养丰富的水团,主要来自于拉普拉塔河与帕图斯泻湖(Patos Lagoon)的淡水排放,出现在巴西南部大陆架的南部(34°S 附近),普拉塔羽流水的密度较低,主要出现在水深 10 m 左右<sup>[38]</sup>。虽然富营养的水体被半永久性温跃层隔离在大陆架海底,但陆架地形、海面风、上升流与涡旋等大气海洋变化在不同时间与空间尺度上可以将南大西洋中央水运送至海洋表面<sup>[39]</sup>。



### 1.1.3 巴塔哥尼亚大陆架(约36°S~57°S)

巴塔哥尼亚大陆架是世界上生产力最高的海域之一。温暖的巴西暖流与寒冷的马尔维纳斯寒流在巴塔哥尼亚大陆架北部(约36°S~38°S)交汇,形成温盐锋面,被称为巴西-马尔维纳斯汇合锋面(Brazil-Malvinas confluence front, BMCF)<sup>[40-41]</sup>。巴西-马尔维纳斯汇合锋面被视为亚南极水域和亚热带水域的分界线。在40°S以南,大陆架环流主要受强西风、潮汐流和马尔维纳斯寒流的影响,马尔维纳斯寒流沿大陆架向北移动<sup>[42]</sup>。巴塔哥尼亚大陆架北部呈现出大规模的季节性分层循环,且该循环随着地表净热量增加的减少和风强度的增加,向南逐渐减弱<sup>[43]</sup>。

由于巴塔哥尼亚大陆架拥有特殊的潮汐动力学特征,除巴西-马尔维纳斯汇合锋面外,巴塔哥尼亚大陆架会形成许多非永久性锋面,这些锋面将具有均匀性质水体的区域与具有分层水结构的区域分开<sup>[44]</sup>。大部分锋面在春季和夏季开始形成,这些锋面系统具有高初级生产力(浮游植物大量繁殖)、高可用性的硝酸盐<sup>[45]</sup>,以及高度聚集的桡足类<sup>[46]</sup>。这些特征为海洋生物创造了多样化的产卵栖息地,并为卵和仔稚鱼提供了适宜的生存条件<sup>[47]</sup>。巴塔哥尼亚大陆架存在3个主要的锋面系统<sup>[48-49]</sup>,包括:大陆架断裂锋面(Shelf-break front)、北巴塔哥尼亚锋面(Northern Patagonia front)和南巴塔哥尼亚锋面(Southern Patagonia front)<sup>[50]</sup>。

## 1.2 主要渔业资源概况

根据沿岸大海洋生态系统划分,世界上共有66个大海洋生态系统<sup>[17]</sup>。西南大西洋(FAO 41渔区)共有3个大海洋生态系统,分别为巴西东部大陆架、巴西南部大陆架和巴塔哥尼亚大陆架。根据FAO统计,1950—2018年,巴塔哥尼亚大陆架最主要的渔获物为阿根廷滑柔鱼与阿根廷无须鳕;巴西东部大陆架与巴西南部大陆架最主要的渔获物为巴西小沙丁鱼与弗氏绒须石首鱼。

根据1950—2018年FAO西南大西洋41渔区渔业产量数据(<https://www.fao.org/statistics/data-collection/en/>),剔除无法识别与年均产量小于100 t的种类后,共整理123种或类,包括2纲、6目、15科、10属、90种。根据Sea Around Us(<https://www.seaaroundus.org/data/#/fao>)的功能组分类,将123种或类分成中上层鱼类、浅水中底层鱼类、深水中底层鱼类、底栖鱼类、岩礁性鱼类、软

骨鱼类、无脊椎类等7类功能组。根据Sea Around Us中Biodiversity数据库,获取123类物种的营养级;根据Fishbase数据库(<https://www.fishbase.ca/search.php>)、Sealifebase(<http://www.sealifebase.ca/>)数据库与以往的文献报道,获取123类物种的适宜温度范围。为方便后续分析,将适宜温度范围的中位数作为该种类的最适宜温度。根据不同种类的最适宜温度,将温度高于20℃的种类定义为暖水种;温度低于10℃的种类定义为冷水种;温度在10~20℃之间的种类定义为温水种<sup>[51]</sup>。

根据功能组与适温组对产量进行分类,对于7类功能组,浅水中底层鱼类与无脊椎类产量占比最高(图2);对于3类适温组,冷水种产量占比最高(图3)。在7类功能组中,相较于其他功能组,浅水中底层鱼类与无脊椎类产量的年间波动较大;在3类适温组中,冷水种产量的年间波动较大。1950—2018年中,西南大西洋产量最高的前4物种为阿根廷无须鳕、阿根廷滑柔鱼、巴西小沙丁鱼、弗氏绒须石首鱼,其产量与其他物种产量的组成关系如图4所示,其中阿根廷无须鳕与阿根廷滑柔鱼的产量远高于其他种类,是西南大西洋最主要的经济渔获物,且与阿根廷无须鳕相比,阿根廷滑柔鱼资源开发较晚,产量的年间波动较大。由于不同渔业资源的分布范围不仅仅局限在单一大海洋生态系统中,因此本文以物种作为分类依据对主要渔业资源进行概述。

### 1.2.1 阿根廷滑柔鱼

阿根廷滑柔鱼是短生命周期的大洋性头足类,广泛分布于22°S~54°S的西南大西洋大陆架和大陆坡海域<sup>[52]</sup>。由于其生命周期短和对环境变化较为敏感等特点,阿根廷滑柔鱼资源量波动较大(图4)<sup>[52]</sup>。通过GPS检测捕捞渔船的行动路线获得阿根廷滑柔鱼的洄游过程,发现其种群在巴西-马尔维纳斯汇合处(Brazil-Malvinas confluence, BMC)北部区域附近产卵后,其幼鱼向南进行索饵洄游,而后再返回北部产卵场繁殖<sup>[53]</sup>。由于其产卵场与索饵场的纬度差异较大,在其生活史早期,会发生由低纬度向高纬度洄游的行为。阿根廷滑柔鱼在北部产卵后,卵会被水流输送到巴西-马尔维纳斯汇合处附近的亚热带汇合处,其生命早期阶段与巴西-马尔维纳斯汇合处有关<sup>[54]</sup>。

由于空间分布位置及栖息地环境的差异,阿

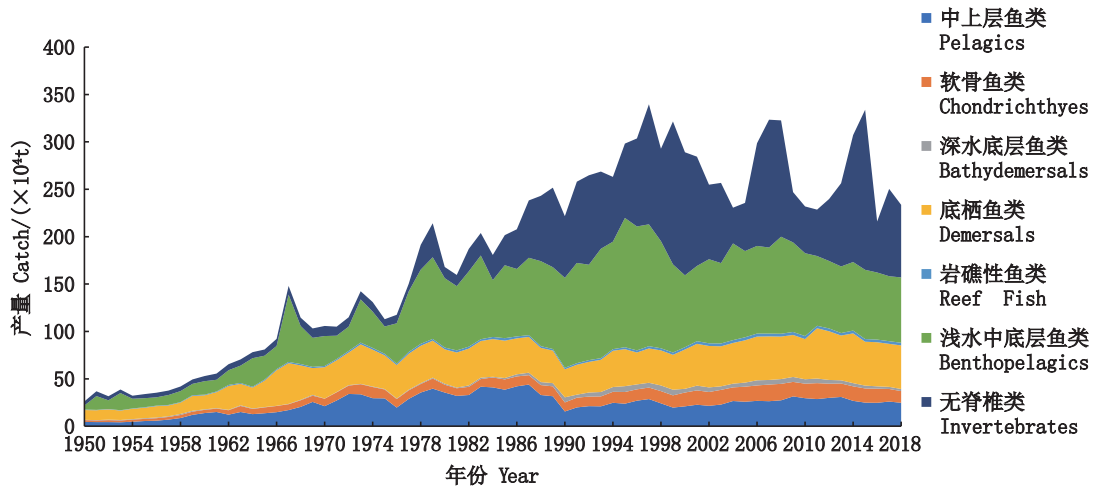


图2 1950—2018年西南大西洋主要渔业资源功能组产量变化

Fig. 2 Yield changes of functional groups of main fishery resources in southwest Atlantic Ocean, 1950—2018

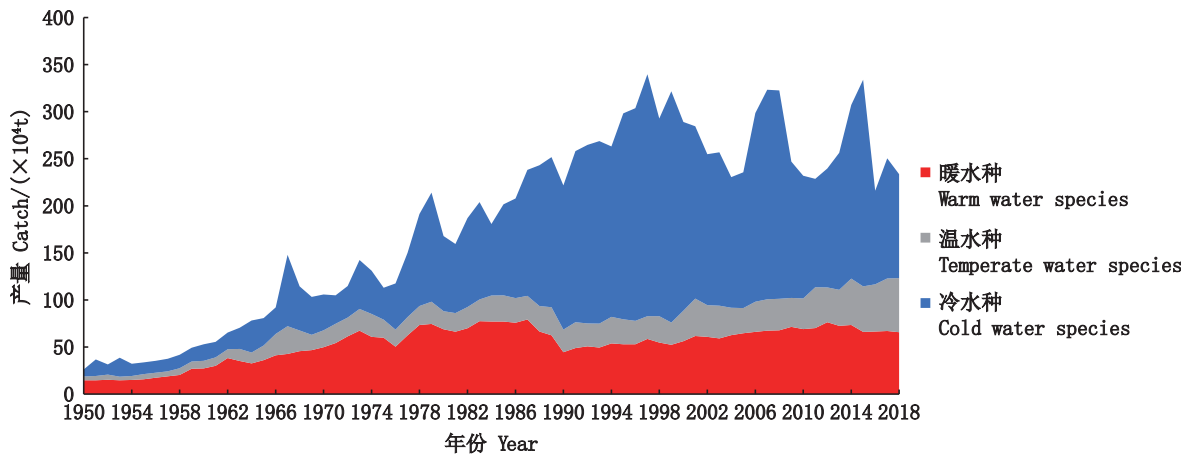


图3 1950—2018年西南大西洋主要渔业资源适温组产量变化

Fig. 3 Yield changes of thermal groups of main fishery resources in southwest Atlantic Ocean, 1950—2018

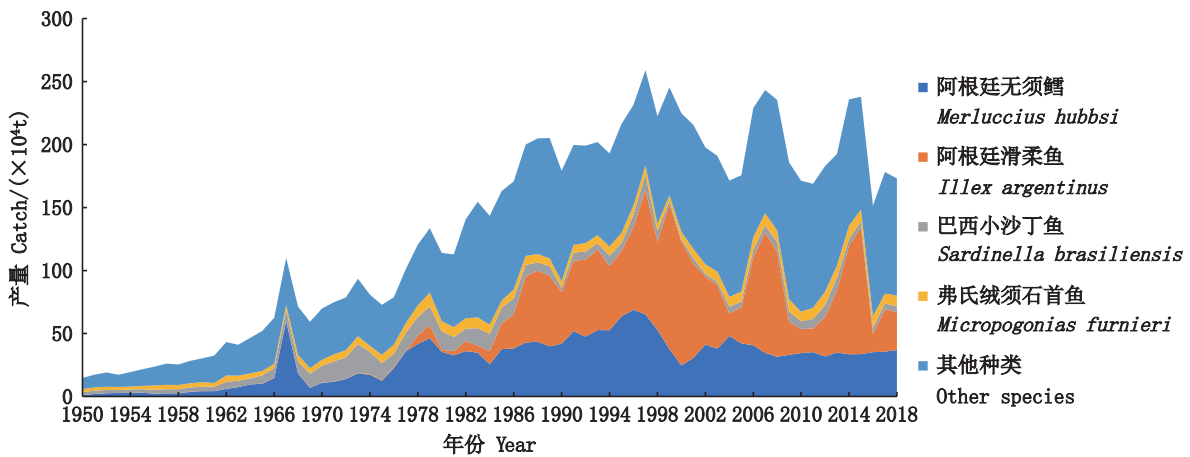


图4 1950—2018年西南大西洋4种主要渔业资源产量变化

Fig. 4 Yield changes of four main fishery resources in southwest Atlantic Ocean, 1950—2018

根廷滑柔鱼会形成具有个体差异的多个种群。依据阿根廷滑柔鱼体型大小、产卵场位置与产卵时间等,将阿根廷滑柔鱼分为4个产卵群体,分别

为布宜诺斯艾利斯-巴塔哥尼亚北部群体(Bonaerensis-North Patagonic stock, BNS)、南部巴塔哥尼亚群体(South Patagonic stock, SPS)、夏季

产卵群体(Summer spawning stock, SSS)和春季产卵群体(Spring spawning stock, SPSS)<sup>[55-56]</sup>。中国鱿钓渔船在西南大西洋公海作业的1—2月,渔场的阿根廷滑柔鱼主要以夏季产卵群体为主,3月开始,巴塔哥尼亚群体大量涌入,成为渔场中的主要种群<sup>[57-58]</sup>。

### 1.2.2 阿根廷无须鳕

阿根廷无须鳕是栖息在西南大西洋的浅水中底层鱼类,分布范围从巴西的卡布弗里乌(Cabo Frío)附近(22°S)到阿根廷南部火地岛(Tierra del Fuego, 55°S),栖息水深为50~500 m<sup>[59]</sup>。阿根廷无须鳕是西南大西洋开发最早且最主要的经济渔获物。

目前,西南大西洋共有5类阿根廷无须鳕产卵群,第一类分布在巴西东部(21°S~29°S);第二类分布在巴西东南部(29°S~34°S)<sup>[60]</sup>;第三类分布在阿根廷-乌拉圭共同渔业区(Argentine-Uruguayan common fishing zone, AUCFZ, 34°S~41°S),被称为布宜诺斯艾利斯种群(Bonaerense stock);第四类分布在41°S以南,被称为巴塔哥尼亚种群(Patagonian stock);第五类分布在圣马蒂亚斯湾(San Matías Gulf)沿海地区<sup>[61]</sup>。其中巴塔哥尼亚种群的产卵地点在隐藏岛(Isla Escondida, 43°30'S~44°S, 65°W)附近<sup>[62]</sup>。阿根廷无须鳕全年产卵,一年共有两个产卵高峰,在35°S~38°S附近的产卵高峰主要出现于南半球冬季(5—7月);在巴塔哥尼亚北部沿海地区(43°S~45°S)的产卵高峰出现在春夏季(10—3月)<sup>[46]</sup>。在巴塔哥尼亚北部地区,阿根廷无须鳕仔稚鱼的资源丰度在11—1月较高<sup>[63]</sup>。阿根廷无须鳕的产卵行为主要发生在巴塔哥尼亚大陆架附近,巴塔哥尼亚大陆架具有海洋锋面系统,锋面将均匀水体与具有分层结构的水体分开<sup>[44]</sup>。巴塔哥尼亚大陆架的锋面结构是非永久性的,在春季和夏季开始形成。锋面系统蕴含丰富的硝酸盐和高密度浮游生物量<sup>[45]</sup>,为成鱼提供了良好的产卵场,同时为卵和幼体创造了有利的孵化条件<sup>[47]</sup>。

### 1.2.3 巴西小沙丁鱼

巴西小沙丁鱼渔业是巴西渔民的重要收入来源。巴西小沙丁鱼主要分布在巴西东南部海湾(Southeast Brazil bight, SBB),渔业捕捞活动从卡布弗里乌(Cabo Frío; 里约热内卢州, Rio de Janeiro State, 约22°S)延伸到圣玛尔塔海角(Cape

Santa Marta; 圣卡塔琳娜州, Santa Catarina State, 约29°S)<sup>[64]</sup>。巴西小沙丁鱼产卵行为主要发生在夜间,沿着巴西东南部海湾的海岸在水深小于100 m的水域产卵。产卵季节主要为南半球的春季和夏季,集中在12—1月<sup>[65]</sup>。渔业资源补充量在6—8月发生增长<sup>[47]</sup>,巴西小沙丁鱼个体在1.5龄左右体长约16~17 cm<sup>[35]</sup>。巴西小沙丁鱼捕捞船队的作业水域通常集中于水深30~50 m的沿海地区<sup>[37]</sup>。

目前,巴西小沙丁鱼没有明确的种群划分与命名。2018年以前,普遍认为巴西东南部的巴西小沙丁鱼只有一个种群<sup>[66]</sup>。但SCHROEDER等<sup>[67]</sup>应用几何形态测量和耳石形态分析两种方法确定里约热内卢州与圣卡塔琳娜州的巴西小沙丁鱼分属于不同种群。

### 1.2.4 弗氏绒须石首鱼

弗氏绒须石首鱼分布于南美洲大陆架,分布区域从加勒比海沿岸到阿根廷沿岸,是底栖渔业的重要捕捞对象之一<sup>[68]</sup>。弗氏绒须石首鱼在仔稚鱼阶段主要位于河口处捕食与生长,成熟阶段生活在靠近河口的海洋大陆架<sup>[69]</sup>,繁殖与产卵时返回河口<sup>[70]</sup>,产卵时间为每年的11—4月<sup>[71]</sup>。此外,河口栖息的弗氏绒须石首鱼的年龄结构在初冬和春季之间有明显变化,初冬以小于1龄的幼鱼为主,而4龄以上的鱼在春季较为丰富。春季成熟的弗氏绒须石首鱼(大于3龄)从近河口大陆架到产卵区进行生殖洄游,因此其丰度较高<sup>[68]</sup>。在巴西,弗氏绒须石首鱼在东南部和南部地区的资源丰度较高,即亚热带河口的资源量高于热带河口<sup>[72]</sup>。在巴西东南部/南部海岸存在两个弗氏绒须石首鱼种群:种群I的栖息范围为23°S~29°S,种群II的栖息范围为29°S~33°S<sup>[69]</sup>。

## 2 主要渔业资源对环境及气候变化的响应

### 2.1 渔业生物学对环境及气候变化的响应

渔业生物学是指渔业资源的生活史、种群动态及资源特征等,具体涵盖早期生活史、生长与繁殖等各个方面<sup>[67]</sup>。环境变化对不同渔业资源的早期生活史均有不同程度的影响,阿根廷滑柔鱼幼鱼补充量受马尔维纳斯寒流与巴西暖流变化的影响<sup>[54,73]</sup>,当巴西暖流增强时,有利温度范围变大,阿根廷滑柔鱼的补充量增高;而当巴西暖流较弱,马尔维纳斯寒流和其他水团较强时,阿



根廷滑柔鱼的补充量会降低<sup>[74]</sup>。在巴西-马尔维纳斯汇合处附近的产卵场,随着巴西暖流和马尔维纳斯寒流强度上升衍生的较高流速的水流会阻碍阿根廷滑柔鱼卵及幼体的运输<sup>[75]</sup>;巴西-马尔维纳斯汇合处还可能会产生一个延伸或更强的锋面区域,对区域内的卵团和幼体运输起到屏障作用<sup>[76]</sup>。在巴西暖流边缘或巴西-马尔维纳斯汇合处内部形成的涡流可能会将对产卵有利温度的水团输送至产卵场以外区域,导致阿根廷滑柔鱼的补充量降低<sup>[76]</sup>。而南大西洋中央水的向上运动会将丰富的营养盐带到水面,有利于阿根廷滑柔鱼和阿根廷无须鳕幼鱼的生长<sup>[75,77]</sup>。锋面的形成对阿根廷无须鳕幼鱼的觅食有积极作用,在阿根廷无须鳕幼鱼出生后的250 d内不同性质水体的隔离有助于中上层水域中保留40%的营养物质供给幼鱼摄食<sup>[77-78]</sup>。温度变化也会对阿根廷无须鳕的幼鱼产生影响,在阿根廷无须鳕分布范围的北部,补充量与温度呈正相关,而在南部则相反<sup>[79]</sup>。寒冷的南大西洋中央水在某些年份可能会涌入巴西南部大陆架的海湾并对巴西小沙丁鱼幼鱼的生长产生负面影响<sup>[80]</sup>。同时,大陆架的风速也会影响巴西小沙丁鱼的补充量<sup>[81-82]</sup>。由于弗氏绒须石首鱼在河口处产卵,因此对幼鱼影响最大的环境因素包括温度、盐度与河流径流量<sup>[72]</sup>。弗氏绒须石首鱼的幼鱼偏好栖息在盐度较低的位置,且补充量与河流径流量呈负相关(低径流量有利于浮游生物在产卵场的保留),与温度呈正相关(较高的温度可以提高幼鱼的存活率),与风的纬向分量呈正相关(更强的陆上风有利于聚集浮游生物)<sup>[83]</sup>。厄尔尼诺年份,降雨量增加,河流径流量增加;拉尼娜年份,降雨量减少,河流径流量减少<sup>[84]</sup>,厄尔尼诺与拉尼娜还会影响风的环流模式<sup>[85]</sup>。厄尔尼诺与拉尼娜通过改变河流径流量与大气环流模式,间接影响弗氏绒须石首鱼的补充量<sup>[83]</sup>。

气候与环境变化也会对不同渔业资源的繁殖行为产生影响<sup>[86]</sup>。雌性阿根廷滑柔鱼生殖过程中的组织能量积累与其栖息地的海洋环境因素密切相关,在较低的海面表面温度,较高的叶绿素a质量浓度,特定的海面高度以及产卵后的一个月中,雌性个体会在体细胞组织和生殖器官中积累更多的能量<sup>[87]</sup>。温跃层水团的中性浮力使阿根廷滑柔鱼卵团漂浮在水中<sup>[88]</sup>,避免了它们

向底部沉淀而导致死亡。温跃层的出现也可以延长阿根廷无须鳕的产卵时间、作为卵的存放区并提高繁殖成功率<sup>[89-90]</sup>。较低的秋季海洋表面温度、较高的春季叶绿素a质量浓度对巴塔哥尼亚大陆架阿根廷无须鳕种群的繁殖具有积极影响<sup>[91]</sup>。BAKUN等<sup>[92]</sup>的研究表明,巴西小沙丁鱼更偏好于在埃克曼(Ekman)输送较低的水域产卵。在厄尔尼诺事件期间,副热带急流增强,巴西小沙丁鱼产卵场的锋面减少,会减少繁殖行为并降低繁殖成功率<sup>[93]</sup>。对于弗氏绒须石首鱼,有学者认为其亲体的繁殖行为对环境条件的适应性与幼体相同,即高温与低径流量有利于产卵行为,气候变化导致的河流径流量改变是最重要的影响因素,其次是海水温度与盐度<sup>[83,94]</sup>。另外,河流径流量改变导致的锋面减少或消失不利于弗氏绒须石首鱼的繁殖行为<sup>[94]</sup>。环境对西南大西洋4种主要渔业资源渔业生物学的影响如表1所示。

## 2.2 资源丰度与空间分布对环境及气候变化的响应

气候与海洋环境因素的变化会导致渔场环境发生改变,并进一步影响物种的资源丰度<sup>[95]</sup>。在西南大西洋,巴西暖流与马尔维纳斯寒流的变化会引起海水温度的变化<sup>[96]</sup>,而海水温度是影响渔业资源资源丰度的主要原因之一<sup>[97]</sup>,阿根廷滑柔鱼的最适海表面温度范围为7~15 °C<sup>[51]</sup>。有研究<sup>[98]</sup>表明,阿根廷滑柔鱼产卵期(尤其是6月和7月)巴塔哥尼亚大陆架北部产卵场的海温与下一季节的渔获量呈负相关。除此之外,在较小的时空尺度上发生的湍流过程可能会诱发大规模的海洋变化<sup>[99]</sup>,该变化直接影响南美沿海地区的气象和海洋学过程<sup>[100]</sup>。CHANG等<sup>[101]</sup>的研究结果表明南极涛动(Antarctic oscillation, AAO)会滞后两年影响阿根廷滑柔鱼,且与其在捕捞季节的资源丰度呈正相关。海洋表面温度对阿根廷无须鳕的资源丰度同样有复杂的影响,在阿根廷无须鳕分布区域的北部,其资源丰度与温度呈正相关,在南部则呈负相关<sup>[102]</sup>。环境因素对巴西小沙丁鱼的影响同样与分布区域相关。在巴西南部大陆架的中部,巴西小沙丁鱼的资源丰度主要受气象要素的影响,与降雨量呈负相关;而在巴西南部大陆架的南部则受海洋学因素的影响较大,资源丰度与盐度、海水温度呈正相关<sup>[35]</sup>。另一方

面,寒冷且盐度较低的普拉塔羽流水也会对巴西小沙丁鱼的资源丰度产生不利影响<sup>[34]</sup>。将海洋表面温度、埃克曼输送与巴西小沙丁鱼的资源丰度建立模型,结果表明,最适宜的埃克曼输送与海洋表面温度的范围分别为 520~700 kg/(s·m)与

24.75~25.50 °C<sup>[80]</sup>。与终身生活在海洋中的物种不同,弗氏绒须石首鱼的资源丰度主要受海水盐度、河流径流量与海水深度的影响,且与三者均呈负相关<sup>[103]</sup>。厄尔尼诺的发生也会导致弗氏绒须石首鱼资源丰度的下降<sup>[72]</sup>。

表1 环境变化对4种主要渔业资源渔业生物学的影响

Tab. 1 Effects of environmental changes on fishery biology of four main fishery resources

物种名称 Species	海流 Current	锋面 Front	温度 Temperature	温跃层 Thermocline
阿根廷滑柔鱼 <i>Illex argentinus</i>	BC增强有利于幼体 <sup>[74]</sup> SACW有利于幼体 <sup>[75]</sup>	有利于幼体 <sup>[76]</sup>	低温有利于繁殖 <sup>[87]</sup>	有利于繁殖 <sup>[88]</sup>
阿根廷无须鳕 <i>Merluccius hubbsi</i>	SACW有利于幼体 <sup>[77]</sup>	有利于幼体 <sup>[77-78]</sup>	北部高温有利于幼体 <sup>[79]</sup> 南部低温有利于幼体 <sup>[79]</sup> 低温有利于繁殖 <sup>[91]</sup>	有利于繁殖 <sup>[89-90]</sup>
巴西小沙丁鱼 <i>Sardinella brasiliensis</i>	SACW入侵不利于幼体 <sup>[80]</sup> 埃克曼输送不利于繁殖 <sup>[92]</sup>	有利于繁殖 <sup>[93]</sup>	-	-
弗氏绒须石首鱼 <i>Micropogonias furnieri</i>	-	有利于繁殖 <sup>[94]</sup>	高温有利于幼体 <sup>[83]</sup> 高温有利于繁殖 <sup>[83,94]</sup>	-
物种名称 Species	叶绿素 a 质量浓度 Chlorophyll-a	河流径流量 River runoff	风速 Wind velocity	厄尔尼诺/拉尼娜 El Niño/La Niña
阿根廷滑柔鱼 <i>Illex argentinus</i>	高叶绿素 a 质量浓度有利于繁殖 <sup>[87]</sup>	-	-	-
阿根廷无须鳕 <i>Merluccius hubbsi</i>	高叶绿素 a 质量浓度有利于繁殖 <sup>[91]</sup>	-	-	-
巴西小沙丁鱼 <i>Sardinella brasiliensis</i>	-	-	对幼体有影响 <sup>[81-82]</sup>	厄尔尼诺不利于繁殖 <sup>[93]</sup>
弗氏绒须石首鱼 <i>Micropogonias furnieri</i>	-	低径流量有利于幼体 <sup>[83]</sup> 低径流量有利于繁殖 <sup>[83,94]</sup>	强风有利于幼体 <sup>[83]</sup>	厄尔尼诺不利于幼体 拉尼娜有利于幼体 <sup>[83]</sup>

空间分布是指渔业资源在海洋中的分布位置,包括垂直分布与水平分布。在阿根廷-乌拉圭共同渔业区,阿根廷滑柔鱼空间位置的分布与深度和海底温度相关性显著。在3—4月、5—6月和7—8月的出海调查中发现,区域内阿根廷滑柔鱼主要分布在较深的深度(80~280 m)和较低的底部温度(4~10 °C, 亚南极水);相比之下,11—12月的调查结果显示,其主要分布在较浅的深度(70~90 m)和较高的底部温度<sup>[104]</sup>。阿根廷滑柔鱼分布的空间位置与巴西-马尔维纳斯汇合锋面密切相关,锋面处的资源更加集中<sup>[76]</sup>。锋面存在导致的初级生产力提高与水体垂直混合的增加同样会影响阿根廷无须鳕的空间分布<sup>[50]</sup>,该物种会向高营养水平的位置移动<sup>[105]</sup>。有研究表明,巴西小沙丁鱼与阿根廷鳀等小型中上层的低营养级物种更偏好低温低盐与深度较浅的水域<sup>[106]</sup>。厄尔尼诺事件期间,巴西小沙丁鱼栖息地内的锋面减

少,导致栖息地内物种分布的减少<sup>[93]</sup>。弗氏绒须石首鱼成熟期的空间分布与盐度呈正相关<sup>[70]</sup>。此外,近些年的全球变暖现象或巴西暖流温度的上升,会使阿根廷滑柔鱼、巴西小沙丁鱼栖息地的海洋表面温度升高,最后导致其渔场南移<sup>[37, 107-108]</sup>。环境对西南大西洋4种主要渔业资源资源丰度与空间分布的影响如表2所示。

### 3 生态系统对气候变化的响应

环境与气候变化会同时改变生态系统内多个物种的地理分布与种群动态<sup>[109]</sup>,并引发生态系统的生态变化与进化反应<sup>[110]</sup>,最终导致生态系统的结构与功能发生改变<sup>[111]</sup>。生态系统的结构包括组成成分与营养结构,功能主要包括能量流动、物质循环与信息传递;其中,组成成分包括生产者、消费者、分解者与非生物的物质与能量<sup>[112]</sup>。食物网是营养结构的主要组成成分,也是能量流动与物质循



环的载体<sup>[112]</sup>。本文将从生态系统的结构与功能出发,初步探究非生物的物质与能量(环境)和食物网

对气候变化的响应,为今后进一步探究西南大西洋生态系统对气候变化响应的具体研究提供基础。

表2 环境变化对4种主要渔业资源资源丰度与空间分布的影响  
Tab. 2 Effects of environmental changes on abundance and spatial distribution of four main fishery resources

物种名称 Species	海流 Current	锋面 Front	温度 Temperature	海水深度 Depth
阿根廷滑柔鱼 <i>Illex argentinus</i>	BC增强资源丰度降低 <sup>[91]</sup> BC增强分布南移 <sup>[107-108]</sup>	空间分布集中 <sup>[76]</sup>	与资源丰度呈负相关 <sup>[98]</sup>	3—8月分布较深 11—12月分布较浅 <sup>[104]</sup>
阿根廷无须鳕 <i>Merluccius hubbsi</i>	-	空间分布集中 <sup>[50]</sup>	北部与资源丰度呈正相关 南部与资源丰度呈负 相关 <sup>[102]</sup>	-
巴西小沙丁鱼 <i>Sardinella brasiliensis</i>	PPW增强资源丰度 降低 <sup>[62]</sup> BC增强分布南移 <sup>[70]</sup>	空间分布集中 <sup>[93]</sup>	SBS南部与资源丰度呈正 相关 <sup>[35]</sup> 温度较低分布集中 <sup>[106]</sup>	SBS中部与资源丰度呈负 相关 <sup>[35]</sup> 深度较浅分布集中 <sup>[106]</sup>
弗氏绒须石首鱼 <i>Micropogonias furnieri</i>	-	-	-	与资源丰度呈负相关 <sup>[103]</sup>
物种名称 Species	降雨量 Rainfall	河流径流量 River runoff	盐度 Salinity	厄尔尼诺/拉尼娜 El Niño/La Niña
阿根廷滑柔鱼 <i>Illex argentinus</i>	-	-	-	-
阿根廷无须鳕 <i>Merluccius hubbsi</i>	-	-	-	-
巴西小沙丁鱼 <i>Sardinella brasiliensis</i>	SBS中部与资源丰度呈负 相关 <sup>[35]</sup>	-	SBS南部与资源丰度呈正 相关 <sup>[35]</sup> 盐度较低分布集中 <sup>[106]</sup>	厄尔尼诺不利于渔场形成 <sup>[93]</sup>
弗氏绒须石首鱼 <i>Micropogonias furnieri</i>	-	与资源丰度呈负 相关 <sup>[103]</sup>	盐度较高分布集中 <sup>[70]</sup>	厄尔尼诺不利于资源丰度 <sup>[72]</sup>

### 3.1 环境对气候变化的响应

生态系统是复杂的适应性系统,在逐渐变化的环境中,生态系统一般不以相对平稳的方式做出响应,而是当环境条件超过临界阈值时,会发生突变<sup>[113-114]</sup>,这种突变一般被称为生态系统的稳态转换(Regime shift),生态系统处于不同稳态交替变化的状态被称为交替稳定状态(Alternative stable states)<sup>[112]</sup>。对于西南大西洋生态系统稳态转换的研究较少,但有研究表明,在全球海洋范围内,1977年与1989年分别发生了两次大规模的稳态转换,鱼类与浮游生物的丰度变化明显<sup>[115-116]</sup>。对于1977年的稳态转换,许多气候指数的改变被确定为导致生态系统发生变化的主要原因,其中包括南方涛动指数(Southern Oscillation index, SOI)、太平洋-北美指数(Pacific North American index, PNA)等共15个气候指数<sup>[117]</sup>。全球变暖及其引起的珊瑚礁漂白现象也会对生态系统稳态转换产生影响,并导致生态系统结构的简化与功能的紊乱<sup>[118]</sup>。

在西南大西洋41渔区生态系统的北部,加勒比海的最南部边缘, TAYLOR等<sup>[119]</sup>通过15年

的观测数据,阐明了海洋生态系统对热带辐合带(Inter tropical convergence zone, ITCZ)向北迁移的影响。有利于上升流形成的海洋信风随着海洋生态系统对热带辐合带的向北迁移而减弱,从而使海洋变暖,并降低初级生产力<sup>[119]</sup>。在赤道附近的赤道大西洋北部夏季海温异常(Atlantic Niños/Niñas)会改变温跃层与海洋深水的上升流<sup>[120-121]</sup>。风向的向极位移也会导致副热带环流与巴西暖流向南移动,导致海域的SST上升<sup>[122]</sup>。过去几十年的巴西暖流变暖造成了全球海洋中最广泛和最强烈的变暖热点之一<sup>[123]</sup>,且变暖区域正沿着巴西暖流向南流动的方向扩张<sup>[37]</sup>。另外,在西南大西洋中部的巴西南部大陆架,降雨、空气湿度与日照时间等大气因素的变化也会影响水团分布模式<sup>[35]</sup>。对巴西南部大陆架影响最大的大气系统是南大西洋副热带高压(South Atlantic subtropical high, SASH)和南大西洋辐合带(South Atlantic convergence zone, SACZ)。南大西洋副热带高压是一个影响巴西海岸风的半永久性气压中心,是夏季巴西南部大陆架形成东北风的主要原因<sup>[33]</sup>。南大西洋辐合带是一个西北-东南向的

云带,从亚马逊地区延伸到巴西东南地区,南大西洋辐合带会为巴西南部大陆架带来高达400 mm/月的强降水<sup>[124]</sup>。南大西洋辐合带伴随着一个在20°S~35°S之间流动的副热带急流(高层大气中最大风的核心),并且沿着副热带高压的西部边界盛行低层极向气流<sup>[125]</sup>。南大西洋副热带高压与南大西洋辐合带的位置与强度变化会对巴西南部大陆架的埃克曼输送与SST产生影响<sup>[82]</sup>。除南大西洋副热带高压与南大西洋辐合带外,在南半球夏季的高层大气中还有两个重要的系统:玻利维亚高压(Bolivian high, BH)和气旋环流系统(Cyclonic circulation system, CCS)<sup>[82]</sup>。其中,玻利维亚高压是一个强烈的反气旋,中心在17°S, 65°W<sup>[126]</sup>;气旋环流系统常见于12月与1月<sup>[127]</sup>。玻利维亚高压和气旋环流系统是南美夏季大气高层环流的典型特征<sup>[82]</sup>。另一个强烈影响巴西南部和东南部天气和气候模式的大气现象是大气阻塞(Atmospheric blocking, AB)。当大气阻塞形成时,冷锋(Cold fronts)等大气瞬变系统的停留时间增长,并会导致持续的天气状况。大气阻塞的特征是由高纬度强高压中心引起的纬向气流破裂,从而中断气旋和反气旋的东移<sup>[128]</sup>。在巴西-马尔维纳斯汇合处附近,拉普拉塔河是受气候变化影响最大的地区之一。冬季盛行的东南风导致陆架内的硝酸盐和硅酸盐等营养物质增加,将拉普拉塔河的大陆径流向北推进,形成亚热带大陆架锋面,导致初级生产力和叶绿素a质量浓度增加<sup>[35]</sup>。ENSO会对降雨量<sup>[129]</sup>、巴西-马尔维纳斯汇合处的风<sup>[130]</sup>与南极绕极流<sup>[48]</sup>产生影响,并分别导致河流径流量异常、风的年际变率与马尔维纳斯寒流的变化。由于全球变暖导致的赤道和副极地区域的上升流带减弱,以及亚热带区域的下降流带减弱,公海上升流将呈减弱的趋势,而沿海上升流保持不变<sup>[131]</sup>。海洋运输过程中的这些变化将对物种幼体的扩散、营养物质和海洋生物的分布以及海洋生态系统中的营养物质循环产生影响<sup>[132]</sup>。

### 3.2 西南大西洋食物网

对于生态系统食物网,通常有上行控制效应(Bottom-up)与下行控制效应(Top-down)两种模式<sup>[133]</sup>。在海洋生态系统中,下行控制效应一般指人为的渔业捕捞行为对高营养级消费者的消耗,是生态系统食物网应对高营养级生物资源丰度

减少的控制效应;上行控制效应一般指环境控制,是环境变化导致低营养级的浮游动植物的变化,如上升流等中尺度海洋过程会使温跃层变得更浅,并将营养物质从深层向上输送<sup>[134]</sup>,养分的增加会使浮游植物的生长增快,增加的能量与物质继续通过食物网流动,具有连续的级联效应,直到更高的营养级<sup>[9]</sup>。上行控制效应与下行控制效应共同作用于种群与群落,完成生态系统食物网的动态控制<sup>[135]</sup>。例如在黑海(The Black Sea)和西北大西洋东斯科舍大陆架(Eastern Scotian shelf)生态系统功能和结构的剧烈变化,都是由密集的捕捞行为(下行效应控制)引发的,导致整个生态系统的营养级联,涉及浮游鱼类、浮游动物和浮游植物3个营养级,以及初级生产的变化(上行效应控制)<sup>[136]</sup>。

从20世纪80年代开始,食物网的结构与功能在生态系统的研究中被逐渐重视起来,并且在90年代初提出了级联假说(Cascade hypothesis)<sup>[137]</sup>。级联假说具有两个约束条件:(1)食物网中所有摄食关系具有等级限制;(2)物种在等级限制中只捕食比自身等级低的物种。但随着关于食物网结构的数据更加详细,级联假说构建的模型往往是不充分且动态不稳定的<sup>[138]</sup>。在21世纪初生态位模型(Niche model)代替了级联假说,成为了研究生态系统食物网的主要模型<sup>[138]</sup>。生态位模型保留了级联假说中捕食的等级限制,但模型赋予食物网中每个物种一个生态位值及对应的捕食范围,这使同类相食和营养重叠(不同消费者具有相同捕食范围)可以在生态位模型中出现<sup>[139]</sup>。生态位模型可以得出具有良好稳定性的食物网模型并与经验食物网契合度较高<sup>[140]</sup>。

本文根据Fishbase、Sealifebase与相关文献整理的食物关系,以阿根廷无须鳕、阿根廷滑柔鱼、巴西小沙丁鱼和弗氏绒须石首鱼等4种西南大西洋主要经济渔获物为基础,构建了西南大西洋的部分食物网。由图5可知,在这个食物网中,阿根廷无须鳕、阿根廷滑柔鱼、阿根廷鳀与扁鲆是相对链接较多,较为重要的物种。对巴塔哥尼亚大陆架的食物网建立多物种营养动力学模型(Multispecies trophodynamic model)发现:(1)阿根廷滑柔鱼资源量的减少有利于阿根廷鳀资源量的补充;(2)阿根廷鳀的高水平捕捞有利于阿根廷

延滑柔鱼资源量的增加,且会导致阿根廷无须鳕资源量的减少;(3)阿根廷无须鳕资源量的减少有利于阿根廷滑柔鱼资源量的增加,阿根廷无须鳕的高水平捕捞不利于阿根廷鳀资源,但中低水平的捕捞对阿根廷鳀资源有利<sup>[141]</sup>。目前对于西南大西洋生态系统食物网对气候变化响应的研

究较少,但在与其邻近的南大洋生态系统的研究中发现,在全球变暖、平流层臭氧消耗和正南方环形模式的驱动下,南大洋的物理变量和环流发生了大规模变化,且这种物理环境的变化正在推动南极海洋食物网的各个层次发生变化,并改变了食物网中南极磷虾等关键物种的分布<sup>[142]</sup>。

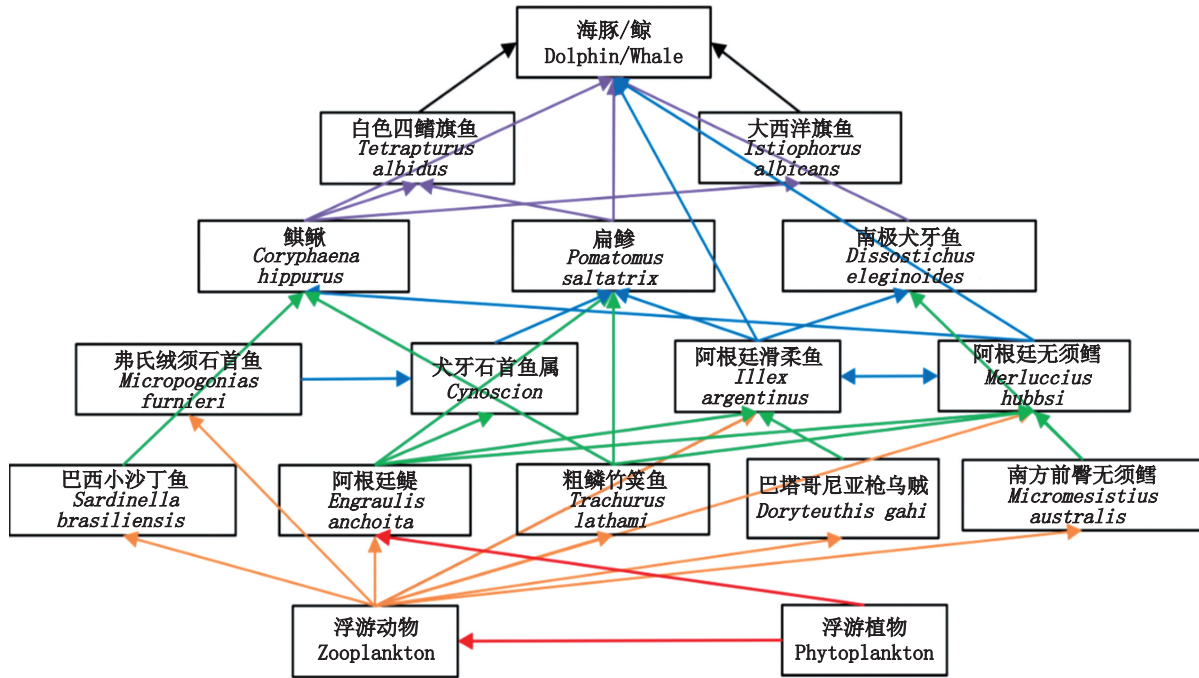


图5 西南大西洋4种主要渔业资源相关食物网

Fig. 5 Food webs related to four main fishery resources in the Southwest Atlantic Ocean

#### 4 总结与展望

本文从西南大西洋生态系统的组成成分与营养结构出发,探究了组成成分中生物(主要渔业资源)与非生物(环境)对气候变化的响应,并基于主要渔业资源对西南大西洋食物网进行总结。政府间气候变化专门委员会(The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)确定了影响海洋生态系统结构、功能和适应能力的4个主要气候驱动因素:pH、温度(Temperature)、溶解氧(Dissolved oxygen)和食料可利用率(Food availability)<sup>[143]</sup>。其中温度是最重要的气候驱动因素,对1951—2014年在北半球海洋生态系统内进行的52项实地观测研究进行综合分析发现,平均上层海洋温度(0~200 m)是对生态系统变化解释率最强的因子。并且在生态系统中,温度在5~20℃时,上行控制效应占主导地位;在温度较低(小与5℃)或温度较高(大于

20℃)时,下行控制效应占主导地位。同时,持续的海洋变暖可能会导致位于寒冷(小与5℃)高纬度海洋生态系统中上行控制效应的增强,以及位于温暖地区(大于10℃)的生态系统中下行控制效应的增强<sup>[144]</sup>。下行控制效应增强被认为是生态系统处于不平衡状态的特征<sup>[145-146]</sup>。温度对西南大西洋生态系统的影响及与上行控制效应与下行控制效应的关系可以作为今后研究的重点之一。

在进行生态系统研究时,很难将生态系统整体作为输入变量进行定量分析,因此一般将生态系统的稳态转换作为变化特征进行探究。稳态转换除表明生态系统从一种状态转移到另一种状态外,有时也代表生态系统中优势物种的转变<sup>[147]</sup>。有研究表明,海洋生态系统的稳态转换是气候变化与捕捞压力改变的共同结果<sup>[117]</sup>。在太平洋海域的相关研究中,气候指数、环境变化与渔业资源变化的稳态转换呈现出同步性<sup>[113]</sup>。关



于西南大西洋生态系统结构与功能稳态转换的研究目前较少,气候变化对生态系统的影响作为研究热点也很少与稳态转换相结合对生态系统的变化情况进行解释。探究生态系统发生稳态转换的原因并将其与气候变化对生态系统的控制机理进行联系可以为西南大西洋生态系统及渔业资源的变化状况提供科学依据。

除将稳态转换作为生态系统发生变化的指示外,有时也将单一物种作为生态系统的代表物种进行研究,将其变化表示为生态系统的变化。对于代表物种的选择有不同标准,其中之一为“关键物种(Keystone species)”。关键物种是指尽管数量相对较少,但对生态系统动态和其他物种的丰度有很大影响的物种,即它们的影响很大并且与其丰度或生物量不成比例<sup>[148-149]</sup>。在西南大西洋的巴西南部大陆架,一种近岸的小型枪乌贼(*Doryteuthis plei*)被当作关键物种进行研究<sup>[150]</sup>。尽管鱿鱼生物量在生态系统中可以迅速增加,即相对重要性可以随季节变化,但其在平均群落结构中的关键营养作用已经在南大洋<sup>[151]</sup>和太平洋<sup>[152]</sup>的相关研究中得到验证。另外,鱿鱼也是海洋生态系统中低营养层向高营养层能量转移的中心<sup>[153]</sup>。也有相关研究<sup>[154]</sup>表明,生物变量对无脊椎动物的影响比对鱼类的影响更大。因此,鱿鱼可以作为关键物种较好的代表生态系统的变化。另一种代表物种的选择方式为“哨兵物种(Sentinel species)”,哨兵物种被定义为以及时、可测量和可解释的方式对生态系统变化作出反应的物种,并可指示生态系统结构或功能的其他未观测到的变化。哨兵物种可以以两种方式监测生态系统:作为过去或正在发生的生态系统变化的指标,或作为未来生态系统变化的领先指标。哨兵物种具有以下特征:(1)对环境变化表现出明显的反应<sup>[155]</sup>;(2)在生态系统食物网中发挥重要作用<sup>[156]</sup>;(3)可以表明人为因素对生态系统的影响<sup>[157]</sup>。寻找西南大西洋生态系统的关键物种与哨兵物种并探究其对气候变化的响应也可以对目前的研究内容进行补充并增加对生态系统的科学认识。

生态系统除了对气候变化作出响应外,捕捞作业等人类活动也会对其产生影响<sup>[158]</sup>。捕捞行为除对捕捞的目标渔业资源产生直接影响外,对环境与其他生物资源的间接影响往往是对多种

植物和无脊椎动物累积影响的后果<sup>[159]</sup>。过度捕捞会增加生态系统结构和功能的不稳定性<sup>[6]</sup>。对阿根廷-乌拉圭共同渔业区已经商业开发的82种海洋生物的平均营养级(Mean trophic level, MTL)、渔业平衡指数(Fisheries-in-balance index, FIB)、营养类别上岸量(Trophic categories landing, TCL)与上岸记录(Landing profile, LP)进行分析,发现MTL从1991年的3.81降低到了2003年的3.4;FIB同样呈下降趋势;TCL与LP的结果表明传统渔业资源(阿根廷无须鳕、弗氏绒须石首鱼等)的产量大幅下降,甲壳类、软体动物和一些鱼类(鳕类等)产量上升。在20世纪90年代初期的阿根廷-乌拉圭共同渔业区,大型、生长缓慢和性成熟较晚的物种为主要上岸物种;21世纪初期,中型鱼类、甲壳类和软体动物占主导地位。对MTL、FIB、TCL和LP综合分析表明,新的渔业资源正在逐步开发,捕捞努力量已从过度开发的资源重新分配到轻度开发的资源,即MTL的降低更多地受到新捕捞技术的影响,而不是市场驱动和环境变化的影响<sup>[160]</sup>。对西南大西洋生态系统进行研究时,将人类活动作为输入层的新增因素,探究其与气候变化对生态系统的综合影响,可以更加全面地得到生态系统结构与功能变化的相关结论。

本文从生物、环境、营养结构等三方面总结了气候变化对西南大西洋生态系统的影响,发现目前关于生态系统对气候变化响应的研究尚不全面,关于食物网对气候变化响应的研究较少且缺少将人类活动与气候变化结合,探究生态系统上行控制效应与下行控制效应变化的研究。在以后的研究中,完善西南大西洋生态系统研究的相关结论,探究生物与环境对气候变化的响应并应用于西南大西洋的渔业管理与渔业法规制定,可以帮助相关国家在全球变暖的背景下实现渔业资源的可持续利用。

#### 参考文献:

- [1] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] MARTINETTO P, ALEMANY D, BOTTO F, et al. Linking the scientific knowledge on marine frontal systems with ecosystem services [J]. *Ambio*, 2020, 49(2): 541-556.

- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Fishery and aquaculture statistics [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020.
- [4] HEWITT C D, GUGLIELMO F, JOUSSAUME S, et al. Recommendations for future research priorities for climate modeling and climate services [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2021, 102(3): E578-E588.
- [5] 周茉, 方星楠, 余为, 等. 厄尔尼诺和拉尼娜事件下西北太平洋柔鱼栖息地时空分布差异[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(4): 984-993.  
ZHOU M, FANG X N, YU W, et al. Difference of spatio-temporal distribution of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the northwest Pacific Ocean under the El Niño and La Niña events [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(4): 984-993.
- [6] VERITY P G, SMETACEK V, SMAYDA T J. Status, trends and the future of the marine pelagic ecosystem [J]. Environmental Conservation, 2002, 29(2): 207-237.
- [7] BEAUGRAND G, EDWARDS M, BRANDER K, et al. Causes and projections of abrupt climate-driven ecosystem shifts in the North Atlantic [J]. Ecology Letters, 2008, 11(11): 1157-1168.
- [8] BEAUGRAND G. Long-term changes in copepod abundance and diversity in the north-east Atlantic in relation to fluctuations in the hydroclimatic environment [J]. Fisheries Oceanography, 2003, 12(4/5): 270-283.
- [9] EDWARDS M, RICHARDSON A J. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch [J]. Nature, 2004, 430(7002): 881-884.
- [10] BEAUGRAND G. The North Sea regime shift: evidence, causes, mechanisms and consequences [J]. Progress in Oceanography, 2004, 60(2/4): 245-262.
- [11] FRIOCOURT Y, DRIJFHOUT S, BLANKE B, et al. Water mass export from drake passage to the Atlantic, Indian, and Pacific Oceans: a Lagrangian model analysis [J]. Journal of Physical Oceanography, 2005, 35(7): 1206-1222.
- [12] FEDULOV P P, REMESLO A V, BURYKIN S N, et al. Variabilidad de la corriente de malvinas [J]. FrenteMantimo, 1990, 6: 121-130.
- [13] WILLSON H R, REES N W. Classification of mesoscale features in the Brazil-Falkland Current confluence zone [J]. Progress in Oceanography, 2000, 45(3/4): 415-426.
- [14] SCHWARZ R, PEREZ J A A. Growth model identification of short-finned squid *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) off southern Brazil using statoliths [J]. Fisheries Research, 2010, 106(2): 177-184.
- [15] GORDON A L, GREENGROVE C L. Geostrophic circulation of the Brazil-Falkland confluence [J]. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1986, 33(5): 573-585.
- [16] 范秀梅, 樊伟, 唐峰华, 等. 巴西暖流和马尔维纳斯寒流交汇点的变动及其影响机制的探讨 [J]. 海洋学报, 2019, 41(9): 86-93.  
FAN X M, FAN W, TANG F H, et al. Research on the variability of Brazil-Malvinas confluence and its cause [J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(9): 86-93.
- [17] MULLER-KARGER F E, RUEDA-ROA D, CHAVEZ F P, et al. Megaregions among the large marine ecosystems of the Americas [J]. Environmental Development, 2017, 22: 52-62.
- [18] SHERMAN K. Toward ecosystem-based management (EBM) of the world's large marine ecosystems during climate change [J]. Environmental Development, 2014, 11: 43-66.
- [19] SHERMAN K, HAMUKUAYA H. Sustainable development of the world's Large Marine Ecosystems [J]. Environmental Development, 2016, 17 Suppl 1: 1-6.
- [20] ODEBRECHT C, CASTELLO J P. The convergence ecosystem in the southwest Atlantic [M]//SEELIGER U, KJERFVE B. Coastal Marine Ecosystems of Latin America. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001:147-165.
- [21] WALSH J J. On the nature of continental shelves [M]. San Diego: Academic Press, 1988: 445-504.
- [22] KNOPPERS B, EKAU W, FIGUEIREDO A G. The coast and shelf of east and northeast Brazil and material transport [J]. Geo-Marine Letters, 1999, 19(3): 171-178.
- [23] LEO Z. The coral reefs of Bahia: morphology, destruction and the major environmental impacts [J]. Anais Academia Brasileira de Ciencias, 1996, 68(3): 439-452.
- [24] CASTRO FILHO B M, DE MIRANDA L B. Physical oceanography of the western Atlantic continental shelf located between 4° N and 34° S coastal segment (4, W) [M]//ROBINSONAR, BRINKKH. The Sea: the Global Coastal Ocean: Regional Studies and Syntheses, vol 11. New York: Wiley, 1998, 11: 209-252.
- [25] SCHMID C, SCHÄFER H, ZENK W, et al. The Vitória Eddy and its relation to the Brazil Current [J]. Journal of Physical Oceanography, 1995, 25(11): 2532-2546.
- [26] EKAU W, KNOPPERS B. An introduction to the pelagic system of the North-East and East Brazilian shelf [J]. Archive of Fishery and Marine Research, 1999, 47(2/3): 113-132.
- [27] STRAMMA L, IKEDA Y, PETERSON R G. Geostrophic transport in the Brazil Current region north of 20° S [J]. DeepSea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1990, 37(12): 1875-1886.
- [28] DA SILVEIRA I C A, DE MIRANDA L B, BROWN W S. On the origins of the North Brazil Current [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(C11): 22501-22512.
- [29] EVANS D L, SIGNORINI S S. Vertical structure of the

- Brazil Current[J]. *Nature*, 1985, 315(6014): 48-50.
- [30] PETERSON R G, STRAMMA L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean [J]. *Progress in Oceanography*, 1991, 26(1): 1-73.
- [31] CAMPOS E J D, LORENZZETTI J A, STEVENSON M R, et al. Penetration of waters from the Brazil-Malvinas confluence region along the South American continental shelf up to 23° S [J]. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 1996, 68(1): 49-58.
- [32] MAAMAATUAIAHUTAPU K, GARÇON V C, PROVOST C, et al. Brazil-Malvinas Confluence: water mass composition [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(C6): 9493-9505.
- [33] PEZZI L P, DE SOUZA R B, ACEVEDOO, et al. Multiyear measurements of the oceanic and atmospheric boundary layers at the Brazil-Malvinas confluence region [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D19): D19103.
- [34] DE MACEDO-SOARES L C P, GARCIA C A E, FREIRE A S, et al. Large-scale ichthyoplankton and water mass distribution along the South Brazil Shelf [J]. *PLoS One*, 2014, 9(3): e91241.
- [35] SUNYÉ P S, SERVAIN J. Effects of seasonal variations in meteorology and oceanography on the Brazilian sardine fishery [J]. *Fisheries Oceanography*, 1998, 7(2): 89-100.
- [36] LOPES R M, KATSURAGAWA M, DIAS J F, et al. Zooplankton and ichthyoplankton distribution on the southern Brazilian shelf: an overview [J]. *Scientia Marina*, 2006, 70(2): 189-202.
- [37] FRANCO B C, DEFEO O, PIOLA A R, et al. Climate change impacts on the atmospheric circulation, ocean, and fisheries in the southwest South Atlantic Ocean: a review [J]. *Climatic Change*, 2020, 162(4): 2359-2377.
- [38] PIOLA A R, MÖLLER O O JR, GUERRERO R A, et al. Variability of the subtropical shelf front off eastern South America: winter 2003 and summer 2004 [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(13): 1639-1648.
- [39] GUERRERO R A, PIOLA A R, FENCO H, et al. The salinity signature of the cross-shelf exchanges in the Southwestern Atlantic Ocean: satellite observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(11): 7794-7810.
- [40] OLSON D B, PODESTÁ G P, EVANS R H, et al. Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas Currents [J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1988, 35(12): 1971-1990.
- [41] FIGUEROA D E, DE ASTARLOA J M D, MARTOS P. Mesopelagic fish distribution in the southwest Atlantic in relation to water masses [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1998, 45(2/3): 317-332.
- [42] MATANO R P, PALMA E D, PIOLA A R. The influence of the Brazil and Malvinas Currents on the southwestern Atlantic shelf circulation [J]. *Ocean Science*, 2010, 6(4): 983-995.
- [43] RIVAS A L, PIOLA A R. Vertical stratification at the shelf off northern Patagonia [J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(10): 1549-1558.
- [44] GLORIOSO P D. Temperature distribution related to shelf-sea fronts on the Patagonian Shelf [J]. *Continental Shelf Research*, 1987, 7(1): 27-34.
- [45] CARRETO J I, BENAVIDEZ H R. Synopsis on the reproductive biology and early life of *Engraulis anchoita*, and related environmental conditions in Argentine waters [J]. *Phytoplankton*, 1990, 65: 2-5.
- [46] BROWN D R, LEONARDUZZI E, MACHINANDIARENA L. Age, growth and mortality of Hake larvae (*Merluccius hubbsi*) in the north Patagonian shelf [J]. *Scientia Marina*, 2004, 68(2): 273-283.
- [47] SÁNCHEZ R P, CIECHOMSKI J D. Spawning and nursery grounds of pelagic fish species in the sea-shelf off Argentina and adjacent areas [J]. *Scientia Marina*, 1995, 59(3): 455-478.
- [48] ACHA E M, MIANZAN H W, GUERRERO R A, et al. Marine fronts at the continental shelves of austral South America: physical and ecological processes [J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 44(1/2): 83-105.
- [49] BOGAZZI E, BALDONI A, RIVAS A, et al. Spatial correspondence between areas of concentration of Patagonian scallop (*Zygochlamys patagonica*) and frontal systems in the southwestern Atlantic [J]. *Fisheries Oceanography*, 2005, 14(5): 359-376.
- [50] ALEMANY D, ACHA E M, IRIBARNE O. The relationship between marine fronts and fish diversity in the Patagonian Shelf Large Marine Ecosystem [J]. *Journal of Biogeography*, 2009, 36(11): 2111-2124.
- [51] 全国科学技术名词审定委员会. 生态学名词 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 29-32.  
China National Committee for Terminology in Science and Technology. Chinese terms in ecology [M]. Beijing: Science Press, 2007: 29-32.
- [52] 王尧耕, 陈新军. 世界大洋性经济柔鱼类资源及其渔业 [M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 240-264.  
WANG Y G, CHEN X J. The resource and fishery of world oceanic economic squid [M]. Beijing: China Ocean Press, 2005: 240-264.
- [53] CHIU T Y, CHIUT S, CHEN C S, et al. Movement patterns determine the availability of Argentine shortfin squid *Illex argentinus* to fisheries [J]. *Fisheries Research*, 2017, 193: 71-80.
- [54] BRUNETTI N E, IVANOVIC M L. Distribution and abundance of early life stages of squid (*Illex argentinus*) in the south-west Atlantic [J]. *ICES Journal of Marine*



- Science, 1992, 49(2): 175-183.
- [55] BRUNETTI N E, IVANOVIC M L, ROSSI G, et al. Fishery biology and life history of *Illex argentinus* [M]// OKUTANI T. Contributed Papers to International Symposium on Large Pelagic Squids. Tokyo: Japan Marine Fishery Resources Research Center, 1998: 217-231.
- [56] BRUNETTI N E, IVANOVIC E, LOUGE E, et al. Reproductive biology and fecundity of two stocks of the squid (*Illex argentinus*) [J]. FrenteMarítimo, 1991, 8 (A): 73-84.
- [57] 刘岩, 张秀梅, 周游, 等. 2011年西南大西洋拖网渔获物阿根廷滑柔鱼生物学分析[J]. 南方水产科学, 2012, 8(3): 39-47.
- LIU Y, ZHANG X M, ZHOU Y, et al. An analysis of biological characteristics of Argentine shortfin squid *Illex argentinus* collected by trawl in southwest Atlantic in 2011 [J]. South China Fisheries Science, 2012, 8(3): 39-47.
- [58] 唐议. 西南大西洋鱿钓作业渔获物—阿根廷滑柔鱼生物学分析[J]. 海洋渔业, 2002, 24(1): 14-19.
- TANG Y. Analysis on biological characteristics of the catch of squid jigging in the southwest Atlantic [J]. Marine Fisheries, 2002, 24(1): 14-19.
- [59] COUSSEAU M B, PERROTTA R G. Pecesmarinos de Argentina: biología, distribución, pesca [M]//Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero, Secretaría de Agricultura, Ganadería. Mar del Plat: Pesca y Alimentación, 1998.
- [60] RUIZ A E, FONDACARO R R. Diet of hake (*Merluccius hubbsi* Marini) in a spawning and nursery area within Patagonian shelf waters [J]. Fisheries Research, 1997, 30 (1/2): 157-160.
- [61] ALEMANY D, ACHA E M, IRIBARNE O O. Marine fronts are important fishing areas for demersal species at the Argentine Sea (Southwest Atlantic Ocean) [J]. Journal of Sea Research, 2014, 87: 56-67.
- [62] DIAZ M V, OLIVAR M P, MACCHI G J. Larval condition of *Merluccius hubbsi* (Marini, 1933) in the northern Patagonian spawning ground [J]. Fisheries Research, 2014, 160: 60-68.
- [63] EHRLICH M D, DE CIECHOMSKI J D. Reseñasobre la distribución de huevos y larvas de merluza (*Merluccius hubbsi*) basada en veinteaños de investigaciones [J]. FrenteMarítimo, 1994, 15(A): 37-50.
- [64] CERGOLE M C. Stock assessment of the Brazilian sardine, *Sardinella brasiliensis*, of the southeastern Coast of Brazil [J]. Scientia Marina, 1995, 59(3/4): 597-610.
- [65] SACCARDO S A, ROSSI-WONGTSCHOWSKI C L D B. Biología e avaliação estoque da sardinha, *Sardinella brasiliensis*: uma compilação [J]. Atlântica, 1991, 13: 29-43.
- [66] STERN N, DOUEK J, GOREN M, et al. With no gap to mind: a shallow genealogy within the world's most widespread small pelagic fish [J]. Ecography, 2018, 41 (3): 491-504.
- [67] SCHROEDER R, SCHWINGEL P R, CORREIA A T. Population structure of the Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*) in the Southwest Atlantic inferred from body morphology and otolith shape signatures [J]. Hydrobiologia, 2022, 849(6): 1367-1381.
- [68] VAZZOLER A. Critical analysis of the maturation curve theoretical model (Santos, 1972) applied to *Micropogonias furnieri* [J]. BJOG: An International Journal of Obstetrics & Gynaecology, 1988, 201(3): 813.
- [69] VAZZOLER A E A M. Síntese de conhecimentos sobre a biologia da corvina, *Micropogonias furnieri* (Desmarest, 1823), da costa do Brasil [J]. Atlantica, 1991, 13(1): 55-74.
- [70] JAUREGUIZAR A J, BAVA J, CAROZZA C R, et al. Distribution of whitemouth croaker *Micropogonias furnieri* in relation to environmental factors at the Río de la Plata estuary, South America [J]. Marine Ecology Progress Series, 2003, 255: 271-282.
- [71] MACCHI G J, CHRISTIANSEN E H. Análisis temporal del proceso de maduración y determinación de la incidencia de atresias en la corvina rubia (*Micropogonias furnieri*) [J]. FrenteMarítimo, 1996, 16: 93-101.
- [72] COSTA M D P, MUELBERT J H, VIEIRA J P, et al. Dealing with temporal variation and different life stages of whitemouth croaker *Micropogonias furnieri* (Actinopterygii, Sciaenidae) in species distribution modeling to improve essential estuarine fish habitat identification [J]. Hydrobiologia, 2015, 762(1): 159-208.
- [73] HAIMOVICI M, BRUNETH N E, RODHOUSE P G, et al. *Illex argentinus* [C]//Proceedings of the Squid Recruitment Dynamics. Rome: FAO, 1998: 27-58.
- [74] GARZOLI S L, GIULIVI C. What forces the variability of the southwestern Atlantic boundary currents? [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1994, 41(10): 1527-1550.
- [75] PIOLA A R, MATANO R P. Brazil and Falklands (Malvinas) currents [M]//STEELE J H, THORPE S A, TUREKIAN K K. Encyclopedia of Ocean Sciences. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2001: 340-349.
- [76] WALUDA C, RODHOUSE P, PODESTÁ G, et al. Surface oceanography of the inferred hatching grounds of *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) and influences on recruitment variability [J]. Marine Biology, 2001, 139(4): 671-679.
- [77] OCAMPO REINALDO M, GONZÁLEZ R, WILLIAMS G, et al. Spatial patterns of the Argentine hake *Merluccius hubbsi* and oceanographic processes in a semi-enclosed

- Patagonian ecosystem [J]. Marine Biology Research, 2013, 9(4): 394-406.
- [78] SPINELLI M L, PAJARO M, MARTOS P, et al. Potential zooplankton preys (Copepoda and Appendicularia) for *Engraulis anchoita* in relation to early larval and spawning distributions in the Patagonian frontal system (SW Atlantic Ocean)[J]. Scientia Marina, 2012, 76(1): 39-47.
- [79] MARRARI M, MACCHI G J, SANTOS B, et al. Influence of environmental conditions on the reproductive success and recruitment of the Argentine hake *Merluccius hubbsi* (southwestern Atlantic Ocean) [J]. Fisheries Oceanography, 2019, 28(1): 66-81.
- [80] PEZZI L P, SOUZA R B, FARIAS P C, et al. Air-sea interaction at the Southern Brazilian Continental Shelf: In situ observations [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(9): 6671-6695.
- [81] JABLONSKI S, LEGEY L F L. Quantifying environmental effects on the recruitment of Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*), 1977-1993 [J]. Scientia Marina, 2004, 68(3): 385-398.
- [82] SOARES H C, PEZZI L P, GHERARDI D F M, et al. Oceanic and atmospheric patterns during spawning periods prior to extreme catches of the Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*) in the southwest Atlantic [J]. Scientia Marina, 2011, 75(4): 665-677.
- [83] ACHA E M, SIMIONATO C G, MIANZAN C C H. Climate-induced year-class fluctuations of whitemouth croaker *Micropogonias furnieri* (Pisces, Sciaenidae) in the Río de la Plata estuary, Argentina-Uruguay [J]. Fisheries Oceanography, 2012, 21(1): 58-77.
- [84] DEPETRIS P J, KEMPE S, LATIF M, et al. ENSO-controlled flooding in the Parana River (1904-1991) [J]. Naturwissenschaften, 1996, 83(3): 127-129.
- [85] SIMIONATO C G, VERA C S, SIEGISMUND F. Surface wind variability on seasonal and interannual scales over Río de la Plata area [J]. Journal of Coastal Research, 2005, 21(4): 770-783.
- [86] LIN D M, CHEN X J, CHEN Y, et al. Ovarian development in Argentinean shortfin squid *Illex argentinus*: group-synchrony for corroboration of intermittent spawning strategy [J]. Hydrobiologia, 2017, 795(1): 327-339.
- [87] LIN D M, CHEN X J, WEI Y R, et al. The energy accumulation of somatic tissue and reproductive organs in post-recruit female *Illex argentinus* and the relationship with sea surface oceanography [J]. Fisheries Research, 2017, 185: 102-114.
- [88] SAKURAI Y, KIYOFUJI H, SAITOH S, et al. Changes in inferred spawning areas of *Todarodes pacificus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) due to changing environmental conditions [J]. ICES Journal of Marine Science, 2000, 57(1): 24-30.
- [89] ILES T D, SINCLAIR M. Atlantic herring: Stock discreteness and abundance [J]. Science, 1982, 215(4533): 627-633.
- [90] MACCHI C J, PÁJARO M, EHRLICH M. Seasonal egg production pattern of the Patagonian stock of Argentine hake (*Merluccius hubbsi*) [J]. Fisheries Research, 2004, 67(1): 25-38.
- [91] MACCHI G J, DIAZ M V, LEONARDUZZI E, et al. Temperature, maternal effects and density-dependent processes during early life stages of Argentine hake as relevant recruitment drivers [J]. Fisheries Research, 2021, 238: 105898.
- [92] BAKUN A, PARRISH R H. Comparative studies of coastal pelagic fish reproductive habitats: the Brazilian sardine (*Sardinella aurita*) [J]. ICES Journal of Marine Science, 1990, 46(3): 269-283.
- [93] PAES E T, DE SOUZA MORAES L E. A new hypothesis on the influence of the El Niño/La Niña upon the biological productivity, ecology and fisheries of the Southern Brazilian Bight [J]. Pan-American Journal of Aquatic Sciences, 2007, 2(2): 94-102.
- [94] NAGY G J, SEVEROV D N, PSHENNIKOV V A, et al. Río de la Plata estuarine system: relationship between river flow and frontal variability [J]. Advances in Space Research, 2008, 41(11): 1876-1881.
- [95] RODHOUSE P G. Managing and forecasting squid fisheries in variable environments [J]. Fisheries Research, 2001, 54(1): 3-8.
- [96] LETA H R. Abundance and distribution of rhynchoteuthion larvae of *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) in the south-western Atlantic [J]. South African Journal of Marine Science, 1992, 12(1): 927-941.
- [97] CHEN C S, HAUNG W B, CHIU T S. Different spatiotemporal distribution of Argentine short-finned squid (*Illex argentinus*) in the Southwest Atlantic during high-abundance year and its relationship to sea water temperature changes [J]. Zoological Studies, 2007, 46(3): 362-374.
- [98] WALUDA C M, TRATHAN P N, RODHOUSE P G. Influence of oceanographic variability on recruitment in the *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) fishery in the South Atlantic [J]. Marine Ecology Progress Series, 1999, 183: 159-167.
- [99] PEZZI L P, RICHARDS K J. Effects of lateral mixing on the mean state and eddy activity of an equatorial ocean [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2003, 108(C12): 3371.
- [100] GAN M A, RAO V B. Surface cyclogenesis over South America [J]. Monthly Weather Review, 1991, 119(5): 1293-1302.
- [101] CHANG K Y, CHEN C S, WANG H Y, et al. The

- Antarctic Oscillation index as an environmental parameter for predicting catches of the Argentine shortfin squid (*Illex argentinus*) (Cephalopoda: Ommastrephidae) in southwest Atlantic waters[J]. *Fishery Bulletin*, 2015, 113(2): 202-212.
- [102] WANG J, PIERCE G J, SACAU M, et al. Remotely sensed local oceanic thermal features and their influence on the distribution of hake (*Merluccius hubbsi*) at the Patagonian shelf edge in the SW Atlantic [J]. *Fisheries Research*, 2007, 83(2/3): 133-144.
- [103] ARAÚJO F G, DA C. GUIMARÃES F J, COSTA M R. Environmental influences on distribution of four Sciaenidae species (Actinopterygii, Perciformes) in a tropical bay at Southeastern Brazil [J]. *Revista Brasileira de Zoologia*, 2006, 23(2): 497-508.
- [104] BAZZINO G, QUIÑONES R A, NORBIS W. Environmental associations of shortfin squid *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) in the Northern Patagonian Shelf [J]. *Fisheries Research*, 2005, 76(3): 401-416.
- [105] OLSON D B, BACKUS R H. The concentrating of organisms at fronts: a cold-water fish and a warm-core Gulf Stream ring [J]. *Journal of Marine Research*, 1985, 43(1): 113-137.
- [106] KATSURAGAWA M, DIAS J F, HARARI J, et al. Patterns in larval fish assemblages under the influence of the Brazil current [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 89: 103-117.
- [107] WALUDA C M, RODHOUSE P G, TRATHAN P N, et al. Remotely sensed mesoscale oceanography and the distribution of *Illex argentinus* in the South Atlantic [J]. *Fisheries Oceanography*, 2001, 10(2): 207-216.
- [108] QUEIRÓS J P, PHILLIPS R A, BAETA A, et al. Habitat, trophic levels and migration patterns of the short-finned squid *Illex argentinus* from stable isotope analysis of beak regions [J]. *Polar Biology*, 2019, 42(12): 2299-2304.
- [109] ALLENDORF F W, HARD J J. Human-induced evolution caused by unnatural selection through harvest of wild animals [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(S1): 9987-9994.
- [110] PARMESAN C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2006, 37: 637-669.
- [111] CHAPIN III F S, WALKER B H, HOBBS R J, et al. Biotic control over the functioning of ecosystems [J]. *Science*, 1997, 277(5325): 500-504.
- [112] CHAPARRO-PEDRAZA P C C. Fast environmental change and eco-evolutionary feedbacks can drive regime shifts in ecosystems before tipping points are crossed [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences of the United States of America*, 2021, 288 (1955) : 20211192.
- [113] 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.
- [114] SCHEFFER M. Alternative attractors of shallow lakes [J]. *The Scientific World Journal*, 2001, 1: 731862.
- [115] FROMENTIN J M, PLANQUE B. *Calanus* and environment in the eastern North Atlantic. II. Influence of the North Atlantic Oscillation on *C. finmarchicus* and *C. helgolandicus* [J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 1996, 134(1/3): 111-118.
- [116] MANTUA N J, HARE S R. The pacific decadal oscillation [J]. *Journal of Oceanography*, 2002, 58(1): 35-44.
- [117] JIAO Y. Regime shift in marine ecosystems and implications for fisheries management, a review [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2009, 19(2): 177-191.
- [118] WORM B, LOTZE H K, HILLEBRAND H, et al. Consumer versus resource control of species diversity and ecosystem functioning [J]. *Nature*, 2002, 417 (6891) : 848-851.
- [119] TAYLOR G T, MULLER-KARGER, F E, THUNELL R C, et al. Ecosystem responses in the southern Caribbean Sea to global climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(47): 19315-19320.
- [120] POLO I, MARTIN-REY M, RODRIGUEZ-FONSECA B, et al. Processes in the Pacific La Niña onset triggered by the Atlantic Niño [J]. *Climate Dynamics*, 2015, 44(1/2): 115-131.
- [121] GÓMARA I, RODRÍGUEZ-FONSECA B, MOHINO E, et al. Skillful prediction of tropical Pacific fisheries provided by Atlantic Niños [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(5): 054066.
- [122] LUMPKIN R, GARZOLI S. Interannual to decadal changes in the western South Atlantic's surface circulation [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116 (C1): C01014.
- [123] HOBDAV A J, PECL G T. Identification of global marine hotspots: sentinels for change and vanguards for adaptation action [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2014, 24(2): 415-425.
- [124] KODAMA Y. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: characteristics of subtropical frontal zones [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1992, 70(4): 813-836.
- [125] KODAMA Y M. Large-Scale common features of subtropical convergence zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part II: conditions of the



- circulations for generating the STCZs [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1993, 71(5): 581-610.
- [126] VIRJI H. A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds [J]. *Monthly Weather Review*, 1981, 109(3): 599-610.
- [127] RAMÍREZ V, KAYANO M T, FERREIRA J F. Statistical analysis of upper tropospheric vortices in the vicinity of northeast Brazil during the 1980-1989 period [J]. *Atmosfera*, 1999, 12(2): 75-88.
- [128] KAYANO M T. Southeastern pacific blocking episodes and their effects on the South American weather [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1999, 69(3/4): 145-155.
- [129] ROBERTSON A W, MECHOSO C R. Interannual and decadal cycles in river flows of southeastern South America [J]. *Journal of Climate*, 1998, 11(10): 2570-2581.
- [130] MECCIA V L, SIMIONATO C G, FIORE M E, et al. Sea surface height variability in the Rio de la Plata estuary from synoptic to inter-annual scales: results of numerical simulations [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 85(2): 327-343.
- [131] HSIEH W W, BOER G J. Global climate change and ocean upwelling [J]. *Fisheries Oceanography*, 1992, 1(4): 333-338.
- [132] ANI C J, ROBSON B. Responses of marine ecosystems to climate change impacts and their treatment in biogeochemical ecosystem models [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 166: 112223.
- [133] DE ALMEIDA FERNANDES L D, FAGUNDES NETTO E B, COUTINHO R, et al. Inter-annual cascade effect on marine food web: a benthic pathway lagging nutrient supply to pelagic fish stock [J]. *PLoS One*, 2017, 12(9): e0184512.
- [134] CHASSOT E, BONHOMMEAU S, DULVY N K, et al. Global marine primary production constrains fisheries catches [J]. *Ecology Letters*, 2010, 13(4): 495-505.
- [135] FRANK K T, PETRIE B, SHACKELL N L. The ups and downs of trophic control in continental shelf ecosystems [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(5): 236-242.
- [136] CURY P M, SHIN Y J, PLANQUE B, et al. Ecosystem oceanography for global change in fisheries [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23(6): 338-346.
- [137] PIMM S L, LAWTON J H, COHEN J E. Food web patterns and their consequences [J]. *Nature*, 1991, 350(6320): 669-674.
- [138] WILLIAMS R J, MARTINEZ N D. Simple rules yield complex food webs [J]. *Nature*, 2000, 404(6774): 180-183.
- [139] HANNAH C, VEZINA A, JOHN M S. The case for marine ecosystem models of intermediate complexity [J]. *Progress in Oceanography*, 2010, 84(1/2): 121-128.
- [140] JORDÁN F, SCHEURING I. Network ecology: topological constraints on ecosystem dynamics [J]. *Physics of Life Reviews*, 2004, 1(3): 139-172.
- [141] KOEN-ALONSO M, YODZIS P. Multispecies modelling of some components of the marine community of northern and central Patagonia, Argentina [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2005, 62(7): 1490-1512.
- [142] ROGERS A D, FRINAULT B A V, BARNES D K A, et al. Antarctic futures: an assessment of climate-driven changes in ecosystem structure, function, and service provisioning in the Southern Ocean [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2020, 12: 87-120.
- [143] HENSON S A, BEAULIEU C, ILYINA T, et al. Rapid emergence of climate change in environmental drivers of marine ecosystems [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 14682.
- [144] BOYCE D G, FRANK K T, WORM B, et al. Spatial patterns and predictors of trophic control in marine ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 2015, 18(10): 1001-1011.
- [145] MYERS R A, BAUM J K, SHEPHERD T D, et al. Cascading effects of the loss of apex predatory sharks from a coastal ocean [J]. *Science*, 2007, 315(5820): 1846-1850.
- [146] DI LORENZO E, MOUNTAIN D, BATCHELDER H P, et al. Advances in marine ecosystem dynamics from US GLOBEC: the horizontal-advection bottom-up forcing paradigm [J]. *Oceanography*, 2013, 26(4): 22-33.
- [147] YATI E, MINOBE S, MANTUA N, et al. Marine ecosystem variations over the North Pacific and their linkage to large-scale climate variability and change [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 578165.
- [148] POWER M E, TILMAN D, ESTES J A, et al. Challenges in the quest for keystones [J]. *BioScience*, 1996, 46(8): 609-620.
- [149] LIBRALATO S, CHRISTENSEN V, PAULY D. A method for identifying keystone species in food web models [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 195(3/4): 153-171.
- [150] GASALLA M A, RODRIGUES A R, POSTUMA F A. The trophic role of the squid *Loligo plei* as a keystone species in the South Brazil Bight ecosystem [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2010, 67(7): 1413-1424.
- [151] RODHOUSE P G, WHITE M G. Cephalopods occupy the ecological niche of epipelagic fish in the Antarctic polar frontal zone [J]. *The Biological Bulletin*, 1995, 189(2): 77-80.
- [152] ARANCIBIA H, NEIRA S. Overview of the Chilean hake (*Merluccius gayi*) stock, a biomass forecast, and the jumbo squid (*Dosidicus gigas*) predator-prey relationship off central Chile (33°S-39°S) [J]. *California Cooperative*

- Oceanic Fisheries Investigations Report, 2008, 49: 104-115.
- [153] RODHOUSE P G, NIGMATULLIN C M. Role as consumers [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 1996, 351(1343): 1003-1022.
- [154] DE AGUIAR F S, DE SOUSA GOMES-GONÇALVES R, ARAÚJO F G. Fish and benthic invertebrate relationship and their association to environmental variables in tropical sandy beaches [J]. Environmental Biology of Fishes, 2020, 103(11): 1309-1321.
- [155] SYDEMAN W J, POLOCZANSKA E, REED T E, et al. Climate change and marine vertebrates [J]. Science, 2015, 350(6262): 772-777.
- [156] ESTES J A, HEITHAUS M, MCCAULEY D J, et al. Megafaunal impacts on structure and function of ocean ecosystems [J]. Annual Review of Environment and Resources, 2016, 41: 83-116.
- [157] HAZEN E L, ABRAHMS B, BRODIE S, et al. Marine top predators as climate and ecosystem sentinels [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2019, 17(10): 565-574.
- [158] 陈新军, 刘金立, 林东明, 等. 渔业资源学研究发展现状及趋势 [J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(5): 1168-1179.
- CHEN X J, LIU J L, LIN D M, et al. Review of development and trend in fisheries resource science [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(5): 1168-1179.
- [159] JENNINGS S, KAISER M J. The effects of fishing on marine ecosystems [J]. Advances in Marine Biology, 1998, 34: 201-212, 212e, 213-352.
- [160] JAUREGUIZAR A J, MILESSI A C. Assessing the sources of the fishing down marine food web process in the Argentinean-Uruguay Common Fishing Zone [J]. Scientia Marina, 2008, 72(1): 25-36.

## A review of fishery ecosystems and their responses to climate variability in southwest Atlantic Ocean

YU Wei<sup>1,2,3,4,5</sup>, LIU Hewei<sup>1</sup>, CHEN Xinjun<sup>1,2,3,4,5</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 4. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 5. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The southwest Atlantic Ocean is one of the most important fishing areas in the world, and fishing countries there include coastal states, such as Argentina, and many non-coastal states, such as China and Japan. The four main commercial species with the highest annual average yield are *Illex argentinus*, *Merluccius hubbsi*, *Sardinella brasiliensis* and *Micropogonias furnieri*. Exploring impacts of climate variability on the fishery ecosystems is conducive to the establishment of an ecosystem-based approach to the protection and rational utilization of the fishery resources. The responses of biological factors (major commercial species), abiotic factors (environmental conditions), and nutritional structure (food web) of the ecosystems to climate variability were summarized based on the perspective of fishery resources and ecosystem. In conclusion, it was found that climate change can affect environment and had impacts on fishery resources and nutritional structure of the ecosystem. For providing ecosystem-based management strategies, selecting indicator species to represent ecosystem changes and investigating confounding impacts of human activities and climate changes in the future research would provide more realistic responses of southwest Atlantic ecosystems to climate variability.

**Key words:** southwest Atlantic Ocean; fishery ecosystem; climate variability; commercial catch; food web