

DOI: 10.12264/JFSC2024-0285

南极磷虾资源与渔场变动及其对环境响应的研究进展

赵云霞^{1,2}, 王新良^{1,2}, 应一平^{1,2}, 朱建成^{1,2}, 刘璐^{1,2}, 李文雄³, 赵宪勇^{1,2}

1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 农业农村部极地渔业可持续利用重点实验室, 山东 青岛 266071;

2. 青岛海洋科技中心, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237;

3. 上海海洋大学, 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306

摘要: 南极大磷虾(*Euphausia superba*)作为南大洋生态系统的关键物种和重要的极地渔业资源, 其资源分布和变动与南大洋的环境因素紧密相关。在气候变化背景下, 科学养护管理南极磷虾资源至关重要, 这不仅关乎南大洋海洋生态系统健康, 也涉及可持续渔业产业的发展。为应对这些挑战, 国内外学者持续开展了大量的磷虾资源调查和相关研究工作, 政府间国际组织南极海洋生物资源养护委员会也积极推进南极磷虾渔业管理新机制建设。本研究总结了南极磷虾资源评估与渔业发展现状, 重点提炼了主要环境因子对南极磷虾资源与渔业时空分布影响的研究进展, 包括海水温度、海冰、流场、水团、锋面、食物, 以及紫外线和光照等, 并着重阐释了环境因子对磷虾生理功能、早期幼体发育与补充、资源输运与存留等关键机能与过程的影响。其中: 海水温度的波动直接影响磷虾的生理功能与分布; 海冰的减少影响磷虾幼体的存活和种群补充; 流场结构对磷虾的输运和分布起着关键作用; 水团和锋面的变化影响磷虾种群的存留与迁移; 食物浓度的季节性变动则直接影响磷虾的繁殖力和生长速率。本研究还对开展气候变化背景下磷虾资源动态研究与渔业可持续发展提出了展望, 以期后续深入开展环境因子对磷虾生态习性的影响, 构建环极尺度的资源监测技术, 以及制定磷虾渔业管理机制等研究方向提供参考。

关键词: 南极磷虾; 资源; 渔业; 环境因子; 气候变化; 南极

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)02-0258-18

南极大磷虾(*Euphausia superba*), 又称南极磷虾, 作为南大洋生态系统中的关键生物, 不仅因其富含磷脂、多不饱和脂肪酸、虾青素等营养物质而备受瞩目, 更因其在新兴海洋生物产业中的潜在价值而受到广泛关注^[1-2]。南极磷虾广泛分布在南大洋(图 1), 南大洋作为全球气候系统的重要组成部分, 通过其独特的大气环流和海洋环流与地球气候系统相互作用, 对全球气候产生深远影响^[3], 其特有的环境特征与环流系统对南极磷虾的分布及渔场的形成有显著的影响^[4-8]。南极磷虾随季节变化沿着大陆架发生周期性迁移, 同时气候变化带来的海冰、温度、浮游植物的时空分布变化, 以及海洋酸化等现象均对南极磷虾的空

间分布产生影响^[9-13]。影响南极磷虾资源分布的主要环境因素可归纳为涉及海洋地理、物理和化学等特征的非生物因素, 如海底地形、海水温度、锋面、海冰、海流等^[14-17], 以及生物因素, 如浮游植物丰度、捕食者分布等^[14, 18-20]。深入了解环境因子对南极磷虾资源时空分布的影响, 不仅有助于我们更好地理解气候变化对南极海洋生态系统的影响, 而且对于南极磷虾渔业管理和资源的可持续利用具有重要的科学指导意义。

1 南大洋环境特征

1970 年联合国教科文组织(United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization,

收稿日期: 2024-09-12; 修订日期: 2024-11-12.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2401201); 国家自然科学基金项目(42006194); 中国水产科学研究院院级基本科研业务费专项(2024TD02)

第一作者/通信作者: 赵云霞(1987-), 女, 博士, 副研究员, 从事极地渔业海洋学研究. E-mail: zhaoyx@ysfri.ac.cn

UNESCO)下属的政府间海洋学委员会(Intergovernmental Oceanographic Commission, IOC)将南大洋定义为: 从南极大陆到南纬 40°为止的海域, 或从南极大陆起, 到亚热带辐合线明显时的连续海域。亚热带辐合线的平均地理位置随季节变化而变化, 因此南大洋的面积也不固定, 约为 $7.7 \times 10^7 \text{ km}^2$, 占世界大洋面积的 22%左右^[21]。南大洋被划分为四个海洋带, 由三个主要锋面分隔, 从北至南依次为亚热带、亚热带锋、亚南极带、亚南极锋、极锋带、极锋(对应南极辐合带)和南极带。南极绕极流(Antarctic circumpolar current, 简称 ACC)是南大洋最重要的环流, 位于 35°S 至 65°S 之间, 是全球唯一一支连续环绕地球的海流, 跨越了南大洋的四个海洋带^[21-22]。南极带以南还存在两个锋面和一个边界(图 1), 由北至南依次为

南极绕极流南锋(southern front of the Antarctic circumpolar current, SACCF)、南极绕极流南边界(southern boundary of the Antarctic circumpolar current, SBdy)和南极陆坡锋(Antarctic slope front, ASF)^[21]。此外, 在南极大陆沿岸, 存在着一支受沿海东风驱动的向西流动的沿岸流, 称之为南极沿岸流(Antarctic coastal current, AC), 与 ACC 在威德尔海和罗斯海交汇处, 形成了顺时针流动的亚极地流涡, 即威德尔流涡(Weddell gyre, WGYre)和罗斯海流涡(Ross gyre)^[23]。SBdy、ASF 与南极辐散带的位置大致相同^[24-25], 其中南极辐散带是基于动力场定义的, 其位置具有显著的年际变化, 反映了流向相反的 ACC 和 AC 相互作用的复杂性^[26], ASF 则依据热力学中次表层的温度梯度的极大值来识别^[27]。

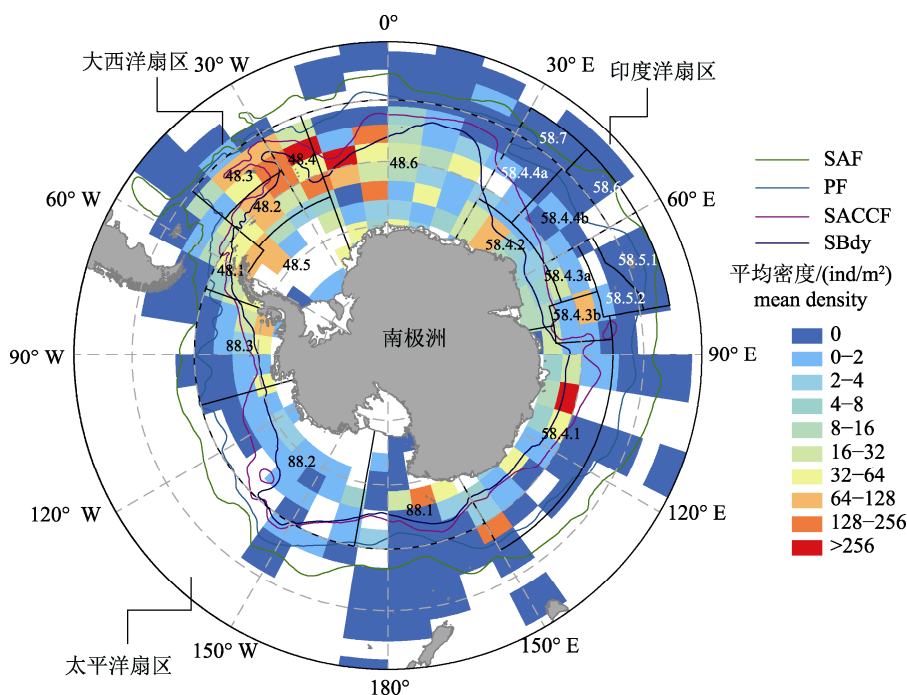


图 1 南大洋南极磷虾资源密度及主要锋面分布示意图

南极磷虾资源数据来自 Krillbase 数据库(<https://www.bas.ac.uk/project/krillbase/>), 时间范围: 1926–2016 年, 空间分辨率: 3°纬度×9°经度; SAF: 亚南极锋, PF: 极锋, SACCF: 南极绕极流南锋, SBdy: 南极绕极流南边界。

Fig. 1 Map of krill resource density and main fronts distribution in the Southern Ocean

Antarctic krill resource data were obtained from Krillbase Database, time range: 1926–2016, spatial resolution: 3° latitude × 9° longitude; SAF: subantarctic front; PF: polar front; SACCF: southern front of the Antarctic circumpolar current; SBdy: southern boundary of the antarctic circumpolar current.

ACC 的平均流速约为 15 cm/s, 由于其流速随深度减弱缓慢且垂向影响深度较深, 因此其流量巨大, 据估算德雷克海峡的年平均流量高达

137 Sv^[28]。ACC 不仅连接太平洋、印度洋与大西洋, 还起到了隔离南极大陆与低纬度地区的作用, 限制了热量向南极输送^[28]。南极磷虾在南大洋特

殊环流系统的影响下呈环南极分布模式(图 1), 南极磷虾与海冰之间存在着密切的联系, 海冰为磷虾提供了重要的生存环境, 而磷虾的迁移又与海冰的季节性分布和海流的输运密切相关, 尤其是对于大规模或中等规模的虾群^[29-33]。然而, 海流与磷虾资源分布之间并非简单的线性因果关系, 海流对南极磷虾的分布、洄游、繁殖与生长的影响是复杂且多维的, 其内在的响应机制仍需要进一步研究^[8]。近年来, 得益于海洋环境观测、海洋环流数值模拟以及生物基因测序等技术的进步, 加深了我们对南极磷虾在环极尺度及主要渔场间的连通与输运的认知^[34-35]。此外, 南大洋是典型的高营养盐、低叶绿素 a 浓度的区域, 约 48% 的海域表面叶绿素 a 浓度低于 0.25 mg/m^3 ^[36], 该区域的海洋生物多样性极为丰富, 对于维持全球海洋生态系统的平衡和生物多样性具有不可替代的作用^[37-38]。

2 南极磷虾资源分布

自 20 世纪起, 南极磷虾研究受到国际广泛关注。1976 年, 南极科学研究委员会 (Scientific Committee on Antarctic Research, 简称 SCAR) 等机构启动了南极海洋生态系统及种群生物学调查计划 (Biological Investigations On Antarctic Systems and Stocks, BIOMASS), 对南极磷虾资源进行了大规模调查。1980–1981 年首次 BIOMASS 调查覆盖了西大西洋, 对南极磷虾进行了第一次大规模种群估计^[39]。1985 年的第二次 BIOMASS 调查则聚焦于南极半岛地区磷虾生物学方面, 特别是在布兰斯菲尔德海峡和南设得兰群岛周围水域, 揭示了这些区域作为磷虾繁殖和育幼场的重要性^[40]。2000 年和 2019 年, 南极海洋生物资源养护委员会 (Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR) 在斯科舍海域与南极半岛海域进行了两次的大规模联合调查, 结果显示, 过去 20 年南极磷虾资源量未发生显著变化^[41]。

除国际联合调查外, 美国南极海洋生物资源计划^[42]、挪威的南奥克尼群岛生物资源调查计划^[43]、俄罗斯的南极半岛和南奥克尼群岛海域生物资源

调查计划均涉及南极磷虾生物资源的研究和监测。我国自 2009 年进入南极磷虾渔业, 依托商业渔船平台, 在磷虾主要渔场进行了长期的南极磷虾资源调查^[44], 与此同时, 依托“雪龙号”和“雪龙 2 号”南极科学考察平台, 我国在环南极尺度开展了大规模且长期的南极磷虾生物资源调查, 这些调查的积累对深入研究南极磷虾的生态习性、种群动态和资源状况具有重要意义。

2.1 空间分布

南极磷虾在 50°S 以南的南大洋中呈环极分布(图 1)。研究表明, 其高密度区域主要集中在 20°W 至 60°W 的大西洋扇区, 且近大陆架海域的渔获量较高, 分布北界通常位于极锋南侧^[45-46]。Atkinson 等通过分析 1926–2004 年获取的磷虾密度数据指出, 磷虾的分布极不均匀, 约 70% 集中在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{W}$ ^[31]。目前普遍认为, 大西洋扇区磷虾密度最高, 印度洋扇区次之, 太平洋扇区最低。大西洋扇区不仅是南极磷虾全球分布的中心, 也可能是环极种群的关键来源^[31]。也有研究指出, 过去 80 年中, 大西洋地区对磷虾的重要性有所下降, 而其他地区可能成为磷虾种群的新栖息地^[13]。

季节性变化方面, 磷虾在冬季主要聚集在大陆架附近, 冬末至春季期间, 随着繁殖季节到来, 磷虾开始沿大陆架坡折北移至大洋水域, 分布范围扩展至 59°S , 丰度显著增加^[46]。在南半球夏季, 磷虾在最北部的分布达到丰度峰值^[4]。在南极半岛, 磷虾主要分布在大陆架内部, 而在印度洋-太平洋区域, 磷虾主要分布在大陆架断裂 200~300 km 范围内的海洋中^[31]。磷虾未成熟个体主要分布在大陆斜坡及其以外海域, 且多栖息在表层水域, 而成熟个体则倾向于大陆架水域, 多栖息于 200 m 以浅水域。在垂向分布上, 约 75% 的磷虾表现出昼夜垂直迁移现象^[47-49], 且倾向于群集行为, 导致在不同水层间密度分布不均, 这种垂直迁移对食物网的连接至关重要, 南极各地都发现了底栖生物以磷虾为食的现象, 约 20% 的磷虾种群分布在 200 m 以深水层^[49]。Siegel 和 Watkins 提出, 200 m 以下磷虾的百分比可能仅为 5%^[50], 而 Clarke 和 Tyler 指出, 磷虾栖息地可延伸至 3000 m 甚至 3500 m 的深水区域^[51]。

随着计算技术的进步, 数值模型已成为研究南大洋环境变化对生物资源影响的重要工具。模型预测显示, 未来威德尔海东部和罗斯海西部也可能成为磷虾新栖息地^[52], 到2100年, 威德尔海西部、普里兹湾和拉扎列夫海域以及阿蒙森海/别林斯高晋海等区域可能成为磷虾的产卵栖息地^[53]。也有研究指出, 大西洋扇区磷虾的栖息地可能正向南收缩^[54], 未来其他地区也可能成为磷虾分布的热点地区, 这些潜在的变化对磷虾资源的保护与管理提出了新的挑战。

2.2 资源量

南极磷虾资源量的准确评估对于 CCAMLR 制订合理的养护措施至关重要。自20世纪80年代末, 磷虾资源量评估受到广泛关注^[46,55-57], 但也面临诸多挑战: 磷虾的大小、迁移行为的多变性对声学探测和网捕采样都构成了挑战; 环极分布的广泛性使得实际调查难以覆盖其所有的栖息地; 磷虾幼体补充量的年际波动导致生物量的不稳定性^[14-15,58], 这使得从不同时间段进行的调查中综合评估生物量变的困难。

在BIOMASS计划之前, Siegel等^[50]的专著中总结了磷虾生物量估计结果, 这些早期研究估算的磷虾生物量范围为 $0.14 \times 10^8 \sim 70 \times 10^8$ t, 这些估计值的不确定性反映了长期以来建立可靠磷虾资源管理的难度。90年代以来, 随着调查技术和评估方法的发展, 磷虾生物量的估值范围调整为 $0.6 \times 10^8 \sim 4.2 \times 10^8$ t^[46,56-57]。Nicol等汇总了当时环南极声学数据, 估计覆盖 8.40×10^6 km² 的磷虾栖息地的生物量约为 $0.60 \times 10^8 \sim 1.55 \times 10^8$ t^[57]。随后, Siegel^[46]更新了 Nicol等^[57]的评估结果, 纳入了 CCAMLR 2000年^[39]和意大利罗斯海调查^[40]的数据, 估算覆盖 1.25×10^7 km² 的生物量为 $0.67 \times 10^8 \sim 2.97 \times 10^8$ t。2008年, 德国和美国的科学家结合历史数据和磷虾生长模型, 评估的磷虾生物量约为 3.79×10^8 t^[59]。CCAMLR在2000年和2019年组织的斯科舍海和南极半岛的大规模调查中, 评估结果分别为 6.03×10^7 t 和 6.26×10^7 t^[60]。

3 南极磷虾渔业发展现状

南极磷虾是南大洋中按吨位计算最大的渔业

资源, 年捕捞量约 400000 吨, 相较于其生物量, 捕捞量处于较低水平, 被视为全球少数未被充分利用的渔业资源之一^[61]。南极磷虾资源开发利用始于1962年, 当时苏联在南极海域进行了渔业探捕活动, 1972—1973年形成商业化渔业, 50年来渔获总量约 1.09×10^7 t。渔业发展历程可分为三个阶段^[61]: 1972—1991年的第一次发展期、1993—2006年的滞长期, 以及2006年以来的第二次发展期。2019/20渔季南极磷虾总捕捞量为 450781 t, 创近30年新高, 其中我国的总捕捞量位于第二位, 挪威位于第一位, 大约是我国总捕捞量的 2~3 倍(图2)。近30年捕捞活动主要集中于西南大西洋扇区的FAO 48区(图2), 该区域的快速变暖和磷虾对气候变化的敏感性引起了广泛关注^[62-64]。

CCAMLR 基于科学研究, 采用生态系统方法和风险预防, 通过对渔业的严格管理, 实现南极海洋生物资源的养护目标(<https://www.ccamlr.org/>)。截至目前, 南极磷虾总捕捞量约占未开发生物量的 0.2%~0.5%, 占捕捞限额的 2%~6%。CCAMLR 制定了二十余项南极磷虾渔业管理规定, 包括渔业准入、捕捞限额、作业方式、数据收集、海洋环境保护等(<https://cm.ccamlr.org/>)。磷虾渔业捕捞限额是管理的核心部分, 决定了磷虾渔业发展规模, 南极磷虾的最大可捕量取决于资源量和资源更新速度, 利用应用分布混合分析方法估算显示, 磷虾最大可捕量高达 5.00×10^7 t^[65], 也有研究通过须鲸对磷虾的需求反推, 得出磷虾最大可捕量约为 7.34×10^7 t^[66], 这些结果均表明南极磷虾的生物学可捕量是相当可观的。

根据 CCAMLR 养护措施 CM51-01 和 CM51-07 规定, 48 区的捕捞限额设定为 5.61×10^6 t, 占资源量的 9.3%, 而谨慎性捕捞限额是 6.2×10^5 t (<https://cm.ccamlr.org/>)。自1997年以来, 48区年捕捞量占该区域资源量的 0.13%~0.72%、占捕捞限额的 1.35%~8.04%(图2)。南极磷虾资源与渔业活动都呈现高度集中的分布特征, 与磷虾生态习性和水文环境密切相关。近年来, 南极半岛周边磷虾主要渔场位置也发生了变化: 20世纪八十至九十年代, 该海域磷虾渔业主要分布在南设得兰群岛北部、西部以及象岛周边; 到21世纪初, 渔业

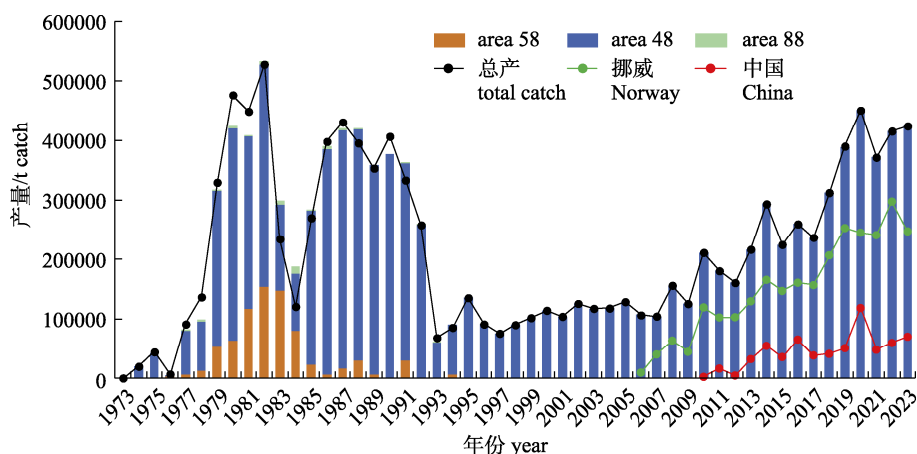


图 2 南极磷虾历年捕捞量(数据来自 CCAMLR 官方网站, <https://www.ccamlr.org/>)

Fig.2 Annual catches of Antarctic krill (Data from CCAMLR official website, <https://www.ccamlr.org/>)

活动开始逐步进入布兰斯菲尔德海峡内部;自 2010 年以来,海峡内部已成为 48.1 亚区的渔业热区^[67]。

4 环境因子对南极磷虾资源与渔场分布的影响

在极地生态系统中,南极磷虾因承担了大部分生态功能而至关重要^[68-71],特别是作为主要渔场的 48.1 亚区成为监测南极生态系统的关键区域,该亚区既是磷虾的主要产卵场和育幼场^[53,72-73],也是磷虾捕食者的重要索饵区^[74],同时该区域也是气候变化的敏感区域^[75-76]。海冰和温度的年际变化与厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)事件和南半球环状模(southern hemisphere annular mode, SAM)等大气模式密切相关^[52,69-70],该区域密集的渔业活动和气候变化引起的海冰和温度的波动均可能对磷虾营养结构及其捕食者的食物需求产生深远影响^[68,71,77-78],同时环境污染和游客数量的增加也可能影响磷虾资源分布^[79-80]。

4.1 气候变化

气候变化对南极磷虾资源分布产生了显著影响,尤其是在西南大西洋区域,这里是全球受气候变化影响最严重的地区之一^[81],研究表明,海水温度的升高和海冰的减少可能导致南极磷虾的栖息地范围发生改变,进而影响其种群动态^[11,34,81]。20 世纪西南大西洋海域海水温度上升约 0.74 °C^[82],海冰持续时间缩短约 3 个月^[83],尽管 SAM 异常越来越频繁^[84],但这些趋势在过去几十年里都出现

了中断^[85-86]。随着气候变暖,南极磷虾的分布可能向南移,趋向南极大陆架区域,导致磷虾的栖息地范围缩小或转移^[13,81]。而这种转移在季节分布上也有体现,气候变化可能引起南极磷虾行为模式的改变,夏季磷虾主要分布在大陆架外区域,而冬季转移到近岸区域,这种行为变化可能与捕食者分布、食物分布的变化以及磷虾对捕食者分布的行为响应有关,但确切原因尚需进一步研究^[81]。模型预测显示,到 21 世纪末南极磷虾的繁殖栖息地可能会大幅度减少,西南极半岛的繁殖地甚至可能完全消失,模型中对磷虾种群补充、分布模式和未来预测的时间序列分析已经揭示了特定气候变化指数对物种种群水平的响应,但这些响应的机制尚不清楚^[47,53,87-88]。

此外,南极磷虾的繁殖和补充是其种群动态变化的关键因素,气候变化背景下,特别是海水温度的升高和海冰的减少,可能会对磷虾的繁殖成功率和幼体的存活率产生负面影响^[19,89],成功的磷虾繁殖主要发生在夏季的陆架/斜坡区域,而这个区域的磷虾可能只占成年种群的一小部分^[50,81]。2000 年前后,南极半岛和南乔治亚岛主要渔场间的磷虾种群的连通与补充也发生了明显的变化,2000 年代,由于海冰范围的减少,使得由 48.1 亚区南极半岛海域输运至 48.3 亚区的南乔治亚岛海域的磷虾幼体减少,影响了 48.3 亚区磷虾种群的补充,48.3 亚区的磷虾补充更多地可能依赖于当地或者附近的磷虾幼体^[34]。此外,磷虾

幼体的补充与海冰的季节性位置密切相关, 早期海冰的形成和冬季的覆盖可能对幼体的生存至关重要^[11,34,87-88]。综上所述, 气候变化主要通过对海水温度和海冰的变化的影响, 进而影响南极磷虾生物资源的时空分布^[11,34,81]。

4.2 海水温度

南极磷虾是一种偏好冷水环境的浮游动物, 海水温度是影响其栖息地和资源分布的关键环境因素^[52], 并且对生物种群的洄游和繁殖活动起着调控作用^[42]。在对磷虾资源分布和渔场适宜温度的研究中, 广义可加模型分析显示, 磷虾作业渔场的适宜海表温度为 0.1~1.8 °C, 其中 0.5~1.5 °C 为最适宜温度范围^[90]。特别是在南极半岛西部水域, 冬季磷虾最大生物量出现在 1.4~1.6 °C 的水温条件下^[18]。2010 至 2021 年间, 对中国渔船作业月份的海表温度和磷虾产量空间分布的相关分析表明, 南极半岛周边海域的磷虾渔场主要分布在 -1~2 °C 海域, 而产量高值区多集中在 0~1 °C 的海域^[91]。

南极磷虾对水温变化较为敏感, 水温的波动对其幼体发育、存活和种群补充具有显著生态学影响^[92-93], 蜕壳周期也会随温度得变化而调整^[94]。尽管磷虾短期内能适应一定程度的水温波动, 但其新陈代谢需求和肌体组织无法承受较大的水温变化, 磷虾栖息地分布极限温差约为 7 °C, 而 1~2 °C 的水温波动即可对磷虾生理功能、分布和行为产生显著影响^[90,95]。Ichii 等人的研究指出, 2000 年前后, 为了适应气候变化, 南极半岛海域的磷虾相对于冬季增温的环境, 选择了有利的秋季降温环境来补充种群, 从而维持了该海域的磷虾存量^[34]。在南乔治亚群岛水域, 夏季南极磷虾生物量与温度呈负相关关系, 高水温年份磷虾补充量较低^[4], 渔业产量也相对较低^[96]。

4.3 海冰

南极海冰范围的变化对南极磷虾的分布具有显著影响, 这种影响在不同海域表现出不同的趋势。近年来, 大部分海域的海冰范围呈现向高纬度收缩的趋势, 但并非所有区域都遵循这一模式^[75]。2014 至 2018 年间, 威德尔海、罗斯海以及印度洋和西太平洋扇区的海冰面积减少, 而别林斯高晋

海和阿蒙森海则观测到海冰增加^[75,97], 这些变化主要与 ENSO 和 SAM 等大气事件和海洋变率的相互作用有关^[97-98]。同时, 南大洋生物活动、地球化学循环和物理过程相互作用的生物地球化学区域也受气候变率影响, 可能导致亚南极水向极地扩张, 而靠近南极大陆的生物地球化学区域可能收缩^[99], 进而影响磷虾资源的时空分布^[10-11]。有研究显示, 西南大西洋地区的磷虾资源核心区域在过去的 90 年中向南收缩^[11], 并在南部高纬度海域形成了新的栖息地^[12], 南极半岛西部别林斯高晋海域由于海冰损失严重^[72,83,100], 磷虾密度下降^[13,30,101], 而太平洋扇区的磷虾密度则有所增加^[19]。

海冰的季节性环极漂移现象是极地浮游生物环极分布模式形成的关键因素^[29], 同时其季节变化也会导致磷虾幼体随着海冰的移动在南北方向上发生迁移^[34]。海冰前进、退缩以及漂移对磷虾迁移路径的影响, 揭示了磷虾与海冰相互作用在控制磷虾环极分布变异性中的重要作用^[23,29,57,102]。磷虾资源丰度与海冰的变化密切关系, 研究表明, 随着海冰密集度的增加, 磷虾的丰度也随之上升, 尤其是在海冰密集度为 60%~70% 的区域, 磷虾的分布最为集中^[103]。此外, 有研究还发现磷虾资源与前一年平均海冰面积之间存在显著的负相关关系^[104]。

海冰不仅为磷虾提供了重要的避难所, 尤其是在其幼虫和幼年阶段, 而且冰下的藻类为磷虾提供了关键的食物来源^[105-107]。磷虾幼体多在夏季出生, 随着秋季浮游植物数量的减少, 海冰的形成与藻类大量繁殖之间存在一个时间差, 这可能成为磷虾生存的一个限制因素^[108], 进入冬季后, 由于初级生产力的降低, 磷虾幼体的食物主要依赖于冰藻^[109]。在 20 世纪 90 年代, 冬季广泛覆盖的海冰使得大量的磷虾幼体分布在 SACCF 以北, 这为南极半岛北部的磷虾种群提供了有效的输运路径, 使其能够向南乔治亚岛周边海域迁移。然而, 有研究指出, 进入 2000 年以后, 海冰面积的相对减少导致了 SACCF 北部南极磷虾幼体数量下降, 进而影响了南乔治亚岛附近海域磷虾种群的补充^[34], 渔场间磷虾资源的补充对磷虾

渔业也有很大影响^[7,104-105]。综上所述, 南极海冰范围的变化与南极磷虾的分布和种群动态密切相关, 海冰的减少可能导致磷虾栖息地的收缩和转移, 影响磷虾的繁殖成功率和幼体的存活率, 进而影响整个南极生态系统的平衡。

4.4 流场

南大洋的环流结构对南极磷虾种群的输运分布起着关键作用, 磷虾也被视为环极尺度上的漂流者^[31, 110-112], 其分布模式显示出明显的非对称性和不均匀性, 磷虾的环极分布模式反映了海洋中大尺度环流与磷虾自主迁移行为之间的动态平衡^[31]。AC 连接了磷虾密度较高的近大陆海域, 而 ACC 则在低纬度地区提供相反方向的运输, ACC 和 AC 为磷虾提供了重要的空间联系, 影响磷虾种群的扩散或存留, 增强了种群的稳定性^[29]。大西洋扇区的 FAO48 区域是南极磷虾渔业活动的核心海域, 从流场结构图中可以看出, 大西洋扇区的水体整体输运方向与 ACC 自西向东的流向一致(图 3), ACC、ASF 和 W Gyre 等环流结构对

48 区磷虾资源分布有显著影响^[29, 50, 113-115]。

在 48.1 亚区, 夏季东风带高纬度沿岸流与威德尔海低纬度洋流海区的磷虾资源尤为丰富^[116], 磷虾主要分布在南设得兰群岛北部、布兰斯菲尔德海峡内部及象岛周边^[41]。南设得兰群岛北部的磷虾输运主要受 ACC 影响, 同时有研究指出, 布兰斯菲尔德海峡北部的海流会通过象岛与乔治王岛中间海域北上, 并围绕南设得兰群岛形成绕岛环流, 这可能对南设得兰群岛北侧的磷虾种群的迁移产生影响^[117]。布兰斯菲尔德海峡北部的海流主要由自西向东的别林斯高晋海沿岸流汇入, 形成布兰希菲尔德海流 (Bransfield current, 简称 BC), 而海峡南部海流方向则由威德尔海北上的 AC 进入到海峡内部的分支形成, 构成海峡内部的两个主要流场结构(图 4)^[113]。威德尔海和别林斯高晋海磷虾通量对海峡内磷虾的生物量、大小和生物结构变化有显著影响^[34]。此外, 海峡内部多沟壑的地形结构, 也形成了许多涡旋结构流场, 对磷虾的迁移与存留产生了影响^[67]。

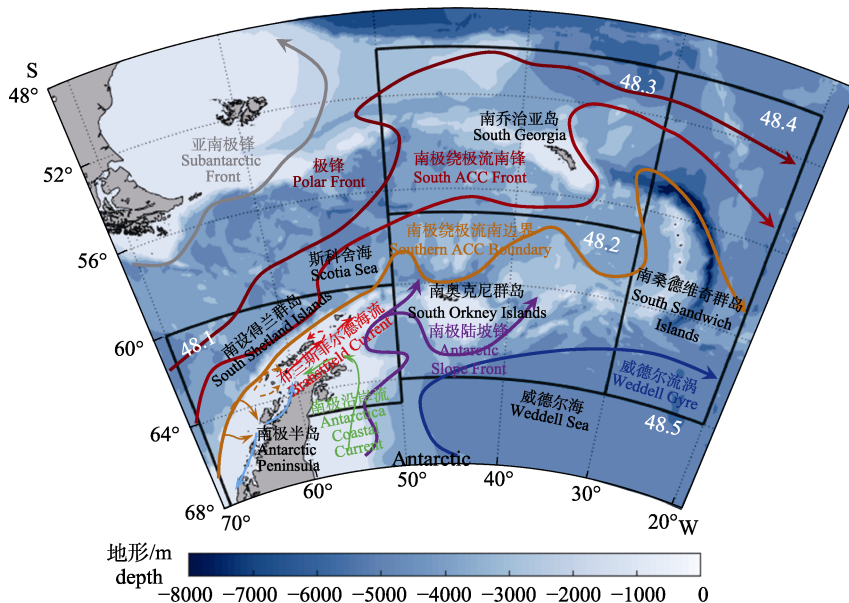


图 3 南大洋大西洋扇区南极磷虾主要渔场区域地形及环流示意图

Fig.3 Map of topography and circulation of the main fishing grounds of Antarctic krill in the Atlantic sector of the southern ocean

基于近十年的渔业声学数据, 研究发现布兰斯菲尔德海峡中南部的存在一个磷虾资源热区, 其形成与磷虾的季节性迁移密切相关, 这种迁移受海峡内流场和水团结构的影响, 迁移通量在不

同深度表现出空间异质性, 海峡内水体的动态输运过程对 48.1 亚区磷虾资源的持续更新至关重要^[67]。象岛周边海域的磷虾通量可能受 SACCF、BC 和 ASF 三部分水体的共同影响^[67], 其中 ASF

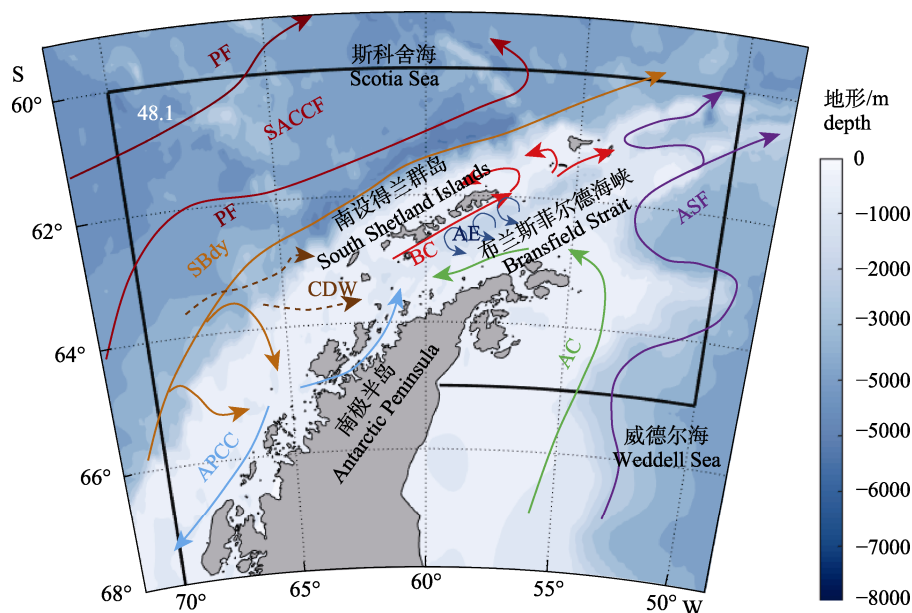


图4 48.1亚区南极磷虾主要渔场区域地形及环流示意图

PF: 极锋, SACCF: 南极绕极流南, SBdy: 南极绕极流南边界, BC: 布兰斯菲尔德海流,

AC: 南极沿岸流, ASF: 南极陆坡锋, APCC: 南极半岛沿岸流, CDW: 绕极深层水, AE: 反气旋式涡旋

Fig. 4 Map of topography and circulation of the main fishing grounds of Antarctic krill in Subarea 48.1

PF: polar front; SACCF: southern front of the Antarctic circumpolar current, SBdy: southern boundary of the Antarctic circumpolar current, BC: Bransfield current, AC: Antarctic coastal current, ASF: Antarctic slope front, APCC: Antarctic peninsula coastal current, CDW: circumpolar deep water, AE: anticyclonic eddy

通过南斯科舍海岭深水通道, 主要向北输送水体至斯科舍海^[118], 这一输运过程对于游泳能力较弱的磷虾幼体迁移尤为重要。

在 48.2 亚区, 磷虾主要集中在南奥克尼群岛周边, 受 SBdy、ASF 和 WGYre 的影响较大^[119]。而在 48.3 亚区, 磷虾主要分布在南乔治亚岛附近, SACCF 在南乔治亚岛磷虾资源补充和输运过程中起着关键作用^[34, 112, 120], 有研究显示, 该区域磷虾的繁殖和早期发育是成功的, 但幼虫的被捕食和冬季的平流输出是导致有些年份资源补充失败的潜在原因^[120]。漂流浮标实验进一步揭示了威德尔海西北部的漂流浮标的三种不同移动轨迹: 向西进入布兰斯菲尔德海峡, 沿南斯科舍海岭南部 1000 m 等深线向东, 或被南斯科舍海岭上方的涡旋挟持^[121], 海流的输运过程连通着各亚区间的磷虾资源的交换和补充^[34]。

4.5 水团与锋面

在 48.1 与 48.2 亚区, 主要水团包括夏季表层水、冬季水、绕极深层水、暖深层水、威德尔海深层水、威德尔海底层水以及布兰斯菲尔德海峡

底层水^[122]。这些水团的分布地形结构密切相关, 受南奥克尼海台冬季水、南极半岛北端的陆架水、斯科舍海的绕极深层水、鲍威尔海盆的暖深层水的共同影响, 使得该海域水团结构呈现出复杂多变的特性^[118]。斯科舍海南部的绕极深层水, 相较于德雷克海峡的绕极深层水, 其高温高盐的性质较弱, 但 WGYre 内部的暖深层水高温高盐性质更明显, 南斯科舍海岭两侧水体性质差异显著, 呈现南冷北暖、陆架区域盐度较大的分布模式^[118]。

南极半岛东侧较强的陆坡流携带大量高盐陆架水向西流动, 进入南极半岛北端陆架及布兰斯菲尔德海峡。陆架水的影响使得布兰斯菲尔德海峡东部海盆底层水较中央海盆底层水更为温暖。Zhao 等对布兰斯菲尔德海峡内发现的一个长期存在的南极磷虾渔业热区的形成机制做了探讨, 发现该热区的水团和锋面环境是磷虾资源在该海域聚集和存留的关键因素^[123]。该资源热区西北方向受别林斯高晋海影响的过度水团 (transitional zonal water with Bellingshausen sea influence, 简称 TBW), 东南方向受威德尔海影响的过度水团

(transitional zonal water with Weddell sea influence, 简称 TWW), 这两个水团以及海峡内两个方向的海流共同作用, 形成了海峡内部的半岛锋面 PF(peninsula front, 简称 PF), 在海峡北部的次表层, 还存在一个沿着南设得兰群岛地形斜坡的较深锋面, 即布兰斯菲尔德锋面(Bransfield front, 简称 BF), 该锋面在次表层将 TWW 和 TBW 分隔开来^[113,123], 海峡内两个锋面的位置随季节和年际变化而变化, 进而影响着海峡内部磷虾资源的时空分布^[123](图 5)。

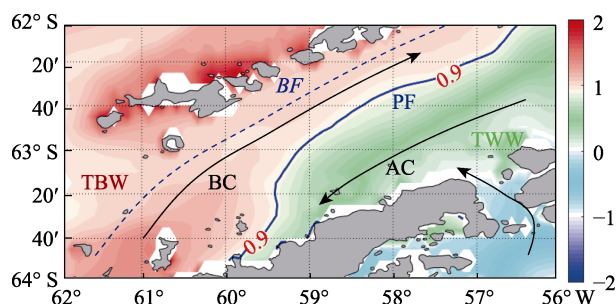


图 5 布兰斯菲尔德海峡内温度、流场与锋面的水平分布
数据来源于 copernicus marine service (<https://doi.org/10.48670/moi-00021>) 1993 ~ 2016 年 12 月、1 月和 2 月气候态月平均温度数据 (垂向积分水层 0.5 m 至 92.3 m); PF: 南极半岛锋面(0.9 °C 等温线); BF: 布兰斯菲尔德海峡锋面; TWW: 受威德尔海影响的过度水团; TBW: 受林斯高普海影响的过度水团; BC: 布兰斯菲尔德海流; AC: 南极沿岸流

Fig. 5 Horizontal distribution of temperature, flow field and fronts in Bransfield Strait

The monthly mean temperature data in December, January and February from 1993 to 2016 are derived from copernicus marine service (vertical integrated water layers from 0.5 m to 92.3 m, <https://doi.org/10.48670/moi-00021>); PF: peninsula front (0.9 °C isotherm); BF: Bransfield front; TWW: transitional zonal waer with Weddell Sea influence; TBW: transitional zonal wter with Bellingshausen Sea influence; BC: Bransfield crrent; AC: Antarctic coastal curret.

4.6 食物浓度

南极磷虾主要以微型和小型生物为食, 特别是浮游植物, 硅藻和冰藻类群是磷虾生长、越冬和繁殖的重要食物, 尤以硅藻为主, 浮游植物的浓度与分布是影响磷虾丰度和分布的关键因素^[124-128]。南半球夏季磷虾的资源密度与叶绿素 a 浓度之间存在正相关^[90, 127-128]或非线性关系^[31]。南大洋大部分海域的营养盐浓度较高、叶绿素 a 浓度较低^[36], 海水中的溶解铁浓度的限制是导致这一现象的主

要原因^[129-130]。南极半岛、斯科舍海、凯尔盖伦高原和大陆边缘等近岸海域的营养盐和叶绿素浓度较高, 为磷虾生长提供了丰富的食物资源, 例如 48.3 亚区内南乔治亚群岛周边, 由于陆源输入的溶解铁, 以及环岛海域较浅的水深, 为浮游植物的生长提供充足的营养, 从而为磷虾提供了丰富的食物^[131]。在垂向分布上, 磷虾集群在秋季倾向于在较深的水层生活, 这与浮游植物浓度的季节变化密切相关^[28]。环境变化导致磷虾觅食行为发生适应性转变, 从春夏季在浮游植物浓度高的近地表觅食, 转向秋季更深处觅食, 同时也避免被捕食者捕食^[47-48]。

南极磷虾的生活史较为复杂, 对环境条件极为敏感, 磷虾生活史的关键过程与浮游植物群落的变动密切相关^[124-126]。在磷虾早期生命周期中, 浮游植物生长周期的提前或推迟都可能会影响幼虾的生长发育, 进而影响磷虾种群的补充。磷虾早期生存依赖三个关键阶段的食物浓度: 幼虾上浮至表层水体后, 需要迅速进食以确保存活; 夏末和秋季, 幼虾需要充足的食物以完成脂质储备越冬; 冬季, 1 龄幼虾依赖冰藻为食, 并依靠海冰作为越冬庇护所^[50]。顺利度过第一个冬季, 春季融冰后浮游植物藻华将促使磷虾进入快速生长阶段^[132]。

南极磷虾繁殖季节的食物浓度对磷虾整个繁殖周期也至关重要^[133]。尽管冬末至春季食物相对充足, 为繁殖早期提供了有利条件, 但夏季食物资源的减少可能对繁殖力产生负面影响^[133]。在南极半岛附近, 夏季磷虾的生长速率下降, 可能导致繁殖力的指数级下降, 磷虾种群的稳定性依赖于繁殖与消耗之间的精细平衡, 这一平衡极易受气候变化的影响^[52]。磷虾个体和种群动态模型分析研究指出, 种内食物竞争是磷虾种群周期变动的主要驱动力^[108]。食物的变化不仅受气候变化的直接影响, 也可能通过磷虾自身的消耗间接影响^[134]。环境初级生产力的提高可以在一定程度上减缓海表温度上升对磷虾生长的负面影响^[135]。在高纬度地区, 海表温度和叶绿素 a 浓度对磷虾生长有正协同效应, 而在低纬度地区则相反^[52]。在食物匮乏

的季节, 磷虾的“负生长”机制有助于其适应环境并维持生命, 这一独特的生存策略需要进一步研究^[95]。

5 结论与展望

气候变化背景下南大洋环境的变化对南极磷虾的资源分布和渔场的变动产生了显著影响。本研究总结了主要环境因子对磷虾资源和渔场的影响: 海水温度的波动直接影响磷虾的生理功能和分布; 海冰的减少可能影响磷虾幼体的存活和种群补充; 流场结构对磷虾的输运和分布起着关键作用; 水团和锋面的变化影响着磷虾的栖息地环境, 进而影响磷虾的存留和迁移; 而食物浓度的季节性变动则直接影响磷虾的繁殖力和生长速率。

综上所述环境因素影响南极磷虾资源的时空分布外, 南大洋的铁限制通过限制浮游植物的光合作用和铁吸收效率, 影响浮游植物的生长, 间接影响着磷虾资源的分布^[131]。此外, 铁限制还与光限制共同影响着南极水域生态系统, 光限制主要体现在太阳辐射的变化上, 通过影响生态系统的能量输入量以及海冰浓度和海表面温度的变化, 进一步影响南极磷虾资源的时空分布^[136]。在高纬度地区, 秋冬季节到达地球表面的太阳辐射能量明显减少, 能量输入的减少对南极磷虾的生理机能重要的影响, 光照季节性变化会影响磷虾卵母细胞的产生^[124]。此外, 有研究显示未来几十年紫外线辐射也可能是影响磷虾资源分布和极地生态系统的重要的环境因素^[30,137]。紫外线辐射的强度和影响水层对磷虾的生理机能、行为反应、初级生产力以及食物网结构等方面均有影响^[138-139]。然而, 针对南极磷虾生态学方面的研究, 尤其是在光照周期、紫外线辐射强度变化对其影响方面的研究, 目前还相对有限, 需要进一步的科学探索和实证研究。

尽管对磷虾已经进行了近百年的研究, 但我们对磷虾对环境因素的适应能力的了解仍有限^[81], 以上总结的很多研究仍然处于初步探索阶段, 南极磷虾大规模种群周期变化背后的机制仍然是一个复杂需要持续研究的科学问题。

5.1 气候变化背景下南极磷虾生物资源变动研究

南极磷虾种群循环周期为 5~6 年, 其评估的生物量波动幅度可达一个数量级以上^[46,50,56-57,59,141]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》指出, 从生态系统角度, 气候变化对南大洋上层水域生态系统和依赖海冰的生物既有正面也有负面效应, 而对底栖生物则主要带来正面影响; 从人类活动和生态系统服务角度看, 气候变化对渔业和旅游业的影响是双刃剑, 对栖息地服务的影响更为复杂^[142]。

随着南极地区气候变化的加速, 基于生态系统水平上的南极磷虾生物资源利用与管理也应是动态变化的, 并且与磷虾资源补充、个体和群体的行为以及生态环境的适应性紧密相关^[81,140,143]。然而, 气候变化对磷虾种群的影响并未明确包含在磷虾渔业管理中, 鉴于气候变化可能对磷虾种群产生深远影响, 建议管理机制和措施制订时考虑气候变化引起的环境变异性对生物种群和资源的影响, 例如根据环境预测因子调整捕捞限额等。由于对磷虾所处的食物网在不同区域生态层面上的差异理解或认知不足, 使得大尺度和大规模的相关分析受到了一定程度的限制, 关于气候变化及其对磷虾生物资源的影响, 科学上仍存较大的不确定性。

总体而言, 针对南极磷虾生物资源, 应加强对主要渔场区域、资源补充区域以及未来潜在栖息地开展系统且长期的科研监测与评估。监测指标包括磷虾及其主要捕食者的资源状况、磷虾生物学特征, 以及物理、化学和生态等环境因素, 以确保对南极磷虾资源的可持续管理和保护。

5.2 南极磷虾渔业管理趋势与应对

2019 年以来, 南极海洋生物资源养护科学委员会(Scientific Committee for the Conservation Antarctic Marine Living Resources, 简称 SC-CAMLR)积极推进南极磷虾渔业管理新机制建设及捕捞限额相关养护措施修订工作^[60]。南极磷虾渔业管理新机制包括三个并行的科学工作版块: 基于声学调查的磷虾资源评估、基于种群动态的谨慎性捕捞限额估算, 以及基于空间重叠分析的限额时空

分配^[44]。2022 年 SC-CAMLR 第 41 届年会中,形成了基于可获得最佳科学数据的 48.1 亚区南极磷虾捕捞限额(66.8 万吨)及其在小尺度管理单元上的时空分配方案,但由于 CCAMLR 各成员方对南极磷虾渔业捕捞限额养护措施 CM51-07(48.1、48.2、48.3 和 48.4 亚区内磷虾渔业触发限额的临时分配方案)的修订始终未能形成一致见解,导致 CM51-07 在 2020/21 渔季到期后被临时延续三个渔季^[144-146]。2024 年,关于 CM51-07 的修订仍未达成一致,最终该养护措施在 2023/24 渔季结束后自动失效,即 48.1、48.2、48.3 和 48.4 亚区不再受到原 CM51-07 分配的限额比例的限制^[147]。

在此背景下,我国南极磷虾渔业也面临新的机遇和挑战:一方面要促进我国南极磷虾渔业的可持续高质量发展,积极挖掘拓展渔场作业空间,合理规划渔业生产,熟练应用连续泵吸捕捞技术,精准探测南极磷虾渔场,提升捕捞国际竞争力;另一方面还要继续保持我国南极磷虾渔业高质量国际履约,严格遵守 CCAMLR 养护管理措施,进一步提升履约能力建设,尤其是履约数据报送的质量和时效、海鸟和哺乳动物防护装置的应用和改进等。此外,从可持续发展需求出发,还需积极推进磷虾渔业管理新机制的建设,围绕其三个工作版块开展深入科学研究。首先,进一步拓展我国磷虾渔船生产性调查的时空覆盖度,提升数据采集的标准化和规范化,尤其是加强数据相对缺乏的区域,以支持“基于声学调查的磷虾资源评估”工作。其次,坚持科学化的磷虾生物学采样与实验,深入开展磷虾种群结构、补充规律及其与环境因子关系研究,以支持“基于种群动态的谨慎性捕捞限额估算”工作。第三,进一步拓展依托磷虾渔船调查平台开展磷虾捕食者动态分布的科学调查,加强气候变化背景下对环境、资源、渔业与磷虾捕食者关系研究,以支持“基于空间重叠分析的限额时空分配”工作。

因此,无论是为了支撑南极磷虾资源和渔业管理新机制的建设需求,还是为了从气候变化角度提升对南极生态系统的认知需求,未来的工作都应进一步加强南极磷虾资源和环境因子的长期系统监测评估,以及它们之间的响应关系研究,

基于科学数据分析制定适应性管理策略,保障极地海洋生态系统健康,促进南极磷虾渔业可持续高质量发展。

参考文献:

- [1] Sun S. Antarctic krill[J]. World Science Technology Research & Development, 2002, 24(4): 57-60. [孙松. 南极磷虾[J]. 世界科技研究与发展, 2002, 24(4): 57-60.]
- [2] Tang Q S, Zhao X Y, Leng K L, et al. Antarctic krill fishing and exploration industry[C]//2014 Report on the Development of China's Strategic Emerging Industries. Beijing: Science Press, 2014, 184-195. [唐启升, 赵宪勇, 冷凯良, 等. 南极磷虾捕捞和开发产业[C]//中国工程科技发展战略研究院. 2014 中国战略性新兴产业发展报告. 北京: 科学出版社, 2014, 184-195.]
- [3] Scher H D, Martin E E. Timing and climatic consequences of the opening of Drake Passage[J]. Science, 2006, 312(5772): 428-430.
- [4] Trathan P N, Murphy E J. Sea surface temperature anomalies near South Georgia: Relationships with the Pacific El Niño regions[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 108(C4): 21-210.
- [5] Trathan P N, Warwick-Evans V, Hinke J T, et al. Managing fishery development in sensitive ecosystems: Identifying penguin habitat use to direct management in Antarctica[J]. Ecosphere, 2018, 9(8): e02392.
- [6] Trathan P N, Warwick-Evans V, Young E F, et al. The ecosystem approach to management of the Antarctic krill fishery-the 'devils are in the detail' at small spatial and temporal scales[J]. Journal of Marine Systems, 2022, 225: 103598.
- [7] Young E F, Belchier M, Hauser L, et al. Oceanography and life history predict contrasting genetic population structure in two Antarctic fish species[J]. Evolutionary Applications, 2015, 8(5): 486-509.
- [8] CCAMLR. Background information to support development of a feedback management strategy for the krill fishery in Subarea 48.1[R]. Antarctic Ecosystem Research Division, Southwest Fisheries Science Center and NOAA Fisheries, 2016.
- [9] Jacquet J, Pauly D, Ainley D, et al. Seafood stewardship in crisis[J]. Nature, 2010, 467(7311): 28-29.
- [10] Sylvester Z T, Long M C, Brooks C M. Detecting climate signals in Southern Ocean krill growth habitat[J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 669508.
- [11] Atkinson A, Hill S L, Pakhomov E A, et al. Krill (*Euphausia superba*) distribution contracts southward during rapid

- regional warming[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(2): 142-147.
- [12] Atkinson A, Hill S L, Reiss C S, et al. Stepping stones towards Antarctica: Switch to southern spawning grounds explains an abrupt range shift in krill[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(4): 1359-1375.
- [13] Yang G, Atkinson A, Hill S L, et al. Changing circumpolar distributions and isoscapes of Antarctic krill: Indo-Pacific habitat refuges counter long-term degradation of the Atlantic sector[J]. *Limnology and Oceanography*, 2021, 66(1): 272-287.
- [14] Siegel V, Loeb V. Recruitment of Antarctic krill *Euphausia superba* and possible causes for its variability[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1995, 123: 45-56.
- [15] Loeb V, Siegel V, Holm-Hansen O, et al. Effects of sea-ice extent and krill or salp dominance on the Antarctic food web[J]. *Nature*, 1997, 387: 897-900.
- [16] Fielding S, Watkins J L, Trathan P N, et al. Interannual variability in Antarctic krill (*Euphausia superba*) density at South Georgia, Southern Ocean: 1997–2013[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2014, 71(9): 2578-2588.
- [17] Reiss C S, Cossio A, Santora J A, et al. Overwinter habitat selection by Antarctic krill under varying sea-ice conditions: Implications for top predators and fishery management[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2017, 568: 1-16.
- [18] Lawson G L, Wiebe P H, Ashjian C J, et al. *Euphausiid* distribution along the Western Antarctic Peninsula—Part B: Distribution of *Euphausiid* aggregations and biomass, and associations with environmental features[J]. *Deep Sea Research II: Topical Studies in Oceanography*, 2008, 55(3-4): 432-454.
- [19] Murphy E J, Watkins J L, Trathan P N, et al. Spatial and temporal operation of the Scotia Sea ecosystem: A review of large-scale links in a krill centred food web[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2007, 362(1477): 113-148.
- [20] Murphy E J, Trathan P N, Watkins J L, et al. Climatically driven fluctuations in Southern Ocean ecosystems[J]. *The Royal Society Proceedings B*, 2007, 274(1629): 3057-3067.
- [21] Chen H X, Lin L N, Pan Z D. An overview of Antarctic circumpolar current research[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2017, 29(2): 183-193. [陈红霞, 林丽娜, 潘增弟. 南极绕极流研究进展综述[J]. *极地研究*, 2017, 29(2): 183-193.]
- [22] Nowlin W D, Klinck J M. The physics of the Antarctic Circumpolar Current[J]. *Reviews of Geophysics*, 1986, 24(3): 469-491.
- [23] Hunt G L, Drinkwater K F, Arrigo K, et al. Advection in polar and sub-polar environments: Impacts on high latitude marine ecosystems[J]. *Progress in Oceanography*, 2016, 149: 40-81.
- [24] Nowlin W D, Klinck J M. The physics of the Antarctic circumpolar current[J]. *Reviews of Geophysics*, 1986, 24(3): 469-491.
- [25] Gao G P, Han S Z, Dong Z Q, et al. Structure and variability of fronts in the South Indian Ocean along sections from Zhongshan Station to Fremantle[J]. *Haiyang Xuebao*, 2003, 25(6): 9-19. [高郭平, 韩树宗, 董兆乾, 等. 南印度洋中国中山站至澳大利亚弗里曼特尔断面海洋锋位置及其年际变化[J]. *海洋学报*, 2003, 25(6): 9-19.]
- [26] Shi J X, Zhao J P. Advances in Chinese studies on water masses, circulation and sea ice in the Southern Ocean (1995-2002)[J]. *Advances in Marine Science*, 2002, 20(4): 116-126. [史久新, 赵进平. 中国南大洋水团、环流和海冰研究进展(1995—2002)[J]. *海洋科学进展*, 2002, 20(4): 116-126.]
- [27] Pu S Z, Dong Z Q, Hu X M, et al. Variability of continental water boundary near Prydz Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 2000, 19(6): 1-9. [蒲书箴, 董兆乾, 胡筱敏, 等. 普里兹湾陆缘水边界的变化[J]. *海洋通报*, 2000, 19(6): 1-9.]
- [28] Rintoul S R, da Silva C E. Antarctic circumpolar current[M]// *Encyclopedia of Ocean Sciences*. Cambridge: Academic Press, 2019: 248-261.
- [29] Thorpe S E, Murphy E J, Watkins J L. Circumpolar connections between Antarctic krill (*Euphausia superba* *Dana*) populations: Investigating the roles of ocean and sea ice transport[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2007, 54(5): 792-810.
- [30] Flores H, Atkinson A, Kawaguchi S, et al. Impact of climate change on Antarctic krill[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, 458: 1-19.
- [31] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E A, et al. Oceanic circumpolar habitats of Antarctic krill[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 362: 1-23.
- [32] Piñones A, Hofmann E E, Dinniman M S, et al. Lagrangian simulation of transport pathways and residence times along the western Antarctic Peninsula[J]. *Deep Sea Research II: Topical Studies in Oceanography*, 2011, 58(13-16): 1524-1539.
- [33] Piñones A, Hofmann E E, Daly K L, et al. Modeling the remote and local connectivity of Antarctic krill populations along the western Antarctic Peninsula[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2013, 481: 69-92.
- [34] Ichii T, Igarashi H, Mori M, et al. Impact of the climate

- regime shift around 2000 on recruitment of Antarctic krill at the Antarctic Peninsula and South Georgia[J]. *Progress in Oceanography*, 2023, 213: 103020.
- [35] Shao C W, Sun S, Liu K Q, et al. The enormous repetitive Antarctic krill genome reveals environmental adaptations and population insights[J]. *Cell*, 2023, 186(6): 1279-1294.e19.
- [36] Pollard R, Tréguer P, Read J. Quantifying nutrient supply to the Southern Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, 111(C5): C05011.
- [37] Grant S M, Hill S L, Trathan P N, et al. Ecosystem services of the Southern Ocean: Trade-offs in decision-making[J]. *Antarctic Science*, 2013, 25(5): 603-617.
- [38] David B, Saucède T. Southern ocean biogeography and communities[M]// *Biodiversity of the Southern Ocean*. Amsterdam: Elsevier, 2015: 43-57.
- [39] Trathan P N, Everson I. Status of the FIBEX acoustic data from the West Atlantic[J]. *CCAMLR Science*, 1994, 1: 35-48.
- [40] Siegel V. A concept of seasonal variation of krill (*Euphausia superba*) distribution and abundance west of the Antarctic peninsula[M]. *Antarctic Ocean and Resources Variability*. Cham: Springer, 1988: 219-230.
- [41] Krafft B A, MacAulay G J, Skaret G, et al. Standing stock of Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana, 1850) (Euphausiacea) in the Southwest Atlantic sector of the Southern Ocean, 2018-19[J]. *Journal of Crustacean Biology*, 2021, 41(3): 1-17.
- [42] Siegel V, Reiss C S, Dietrich K S, et al. Distribution and abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*) along the Antarctic Peninsula[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2013, 77: 63-74.
- [43] Krafft B A, Krag L A, Knutsen T, et al. Summer distribution and demography of Antarctic krill *Euphausia superba* Dana, 1850 (Euphausiacea) at the South Orkney Islands, 2011-2015[J]. *Journal of Crustacean Biology*, 2018, 38(6): 682-688.
- [44] CCAMLR. Report of the 41th meeting of the Scientific Committee for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources[R]. Hobart: CCAMLR, 2022.
- [45] Marr J W S. The natural history and geography of the Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana)[M]. *Discovery Report*, 1962, 32: 33-464.
- [46] Siegel V. Distribution and population dynamics of *Euphausia superba*: Summary of recent findings[J]. *Polar Biology*, 2005, 29(1): 1-22.
- [47] Lascara C M, Hofmann E E, Ross R M, et al. Seasonal variability in the distribution of Antarctic krill, *Euphausia superba*, west of the Antarctic Peninsula[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1999, 46(6): 951-984.
- [48] Fielding S, Watkins J L, Collins M A, et al. Acoustic determination of the distribution of fish and krill across the Scotia Sea in spring 2006, summer 2008 and autumn 2009[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 59-60: 173-188.
- [49] Schmidt K, Atkinson A, Steigenberger S, et al. Seabed foraging by Antarctic krill: Implications for stock assessment, benthic-pelagic coupling, and the vertical transfer of iron[J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, 56(4): 1411-1428.
- [50] Siegel V, Watkins J L. Distribution, biomass and demography of Antarctic krill, *Euphausia superba*[M]// *Biology and Ecology of Antarctic Krill*. Cham: Springer, 2016: 21-100.
- [51] Clarke A, Tyler P A. Adult Antarctic krill feeding at abyssal depths[J]. *Current Biology*, 2008, 18(4): 282-285.
- [52] Veytia D, Corney S, Meiners K M, et al. Circumpolar projections of Antarctic krill growth potential[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10: 568-575.
- [53] Piñones A, Fedorov A V. Projected changes of Antarctic krill habitat by the end of the 21st century[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(16): 8580-8589.
- [54] Kawaguchi S, Atkinson A, Bahlburg D, et al. Climate change impacts on Antarctic krill behaviour and population dynamics[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2024, 5(1): 43-58.
- [55] Miller D G M, Hampton I. Krill aggregation characteristics: Spatial distribution patterns from hydroacoustic observations[J]. *Polar Biology*, 1989, 10(2): 125-134.
- [56] Voronina N M. Comparative abundance and distribution of major filter-feeders in the Antarctic pelagic zone[J]. *Journal of Marine Systems*, 1998, 17(1-4): 375-390.
- [57] Nicol S, Constable A J, Pauly T. Estimates of circumpolar abundance of Antarctic krill based on recent acoustic density measurements[J]. *CCAMLR Science*, 2000, 7: 87-99.
- [58] Mackintosh N A. Distribution of post-larval krill in the Antarctic[J]. *Discovery Reports*, 1973, 36: 95-156.
- [59] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E A, et al. A re-appraisal of the total biomass and annual production of Antarctic krill[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(5): 727-740.
- [60] CCAMLR. Report of the 38th Meeting of the Scientific Committee for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources[R]. Hobart: CCAMLR, 2019.
- [61] Zhao X Y, Zuo T, Leng K L, et al. Engineering science and

- technology challenges in the Antarctic krill fishery[J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(2): 85-90. [赵宪勇, 左涛, 冷凯良, 等. 南极磷虾渔业发展的工程科技需求[J]. 中国工程科学, 2016, 18(2): 85-90.]
- [62] Cavanagh R D, Hill S L, Knowland C A, et al. Stakeholder perspectives on ecosystem-based management of the Antarctic krill fishery[J]. Marine Policy, 2016, 68: 205-211.
- [63] Hill S L, Atkinson A, Darby C, et al. Is current management of the Antarctic krill fishery in the Atlantic sector of the Southern Ocean precautionary?[J]. CCAMLR Science, 2016, 23: 31-51.
- [64] Brooks C M, Ainley D G, Abrams P A, et al. Antarctic fisheries: Factor climate change into their management[J]. Nature, 2018, 558: 177-180.
- [65] Wang R, Lu B W, Li C L, et al. Age-groups of Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana) by distribution mixture analysis from length-frequency data[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1995, 26(6): 598-605. [王荣, 鲁北伟, 李超伦, 等. 南极磷虾年龄组成的体长频数分布混合分析[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(6): 598-605.]
- [66] Wang R, Sun S. Krill fishery in the Southern Ocean-Its present and future[J]. Marine Science, 1995, 19(2): 28-32. [王荣, 孙松. 南极磷虾渔业现状与展望[J]. 海洋科学, 1995, 19(2): 28-32.]
- [67] Zhao Y X, Wang X L, Zhao X Y, et al. A statistical assessment of the density of Antarctic krill based on “chaotic” acoustic data collected by a commercial fishing vessel[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 934504.
- [68] Murphy E J, Cavanagh R D, Drinkwater K F, et al. Understanding the structure and functioning of polar pelagic ecosystems to predict the impacts of change[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2016, 283(1844): 20161646.
- [69] Trivelpiece W Z, Hinke J T, Miller A K, et al. Variability in krill biomass links harvesting and climate warming to penguin population changes in Antarctica[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(18): 7625-7628.
- [70] Murphy E J, Hofmann E E. End-to-end in Southern Ocean ecosystems[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2012, 4(3): 264-271.
- [71] McBride M M, Dalpadado P, Drinkwater K F, et al. Krill, climate, and contrasting future scenarios for Arctic and Antarctic fisheries[J]. ICES Journal of Marine Science, 2014, 71(7): 1934-1955.
- [72] Henley S F, Jones E M, Venables H J, et al. . Macronutrient and carbon supply, uptake and cycling across the Antarctic Peninsula shelf during summer[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences. 2018, 376(2122): 20170168.
- [73] Perry F A, Atkinson A, Sailley S F, et al. Habitat partitioning in Antarctic krill: Spawning hotspots and nursery areas[J]. PLoS One, 2019, 14(7): e0219325.
- [74] Hinke J T, Cossio A M, Goebel M E, et al. Identifying risk: Concurrent overlap of the Antarctic krill fishery with krill-dependent predators in the Scotia Sea[J]. PLoS One, 2017, 12(1): e0170132.
- [75] Jones J M, Gille S T, Goosse H, et al. Assessing recent trends in high-latitude Southern Hemisphere surface climate[J]. Nature Climate Change, 2016, 6: 917-926.
- [76] Hendry K R, Meredith M P, Ducklow H W. The marine system of the West Antarctic Peninsula: Status and strategy for progress[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2018, 376(2122): 20170179.
- [77] Boyd I L. Antarctic marine mammals[M]// Perrin W F, Würsig B, Thewissen J G M. Encyclopedia of Marine Mammals (Second Edition). Cambridge: Academic Press, 2009: 42-46.
- [78] Ainley D G, Pauly D. Fishing down the food web of the Antarctic continental shelf and slope[J]. Polar Record, 2014, 50(1): 92-107.
- [79] Bargagli R. Environmental contamination in Antarctic ecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2008, 400(1-3): 212-226.
- [80] Waller C L, Griffiths H J, Waluda C M, et al. Microplastics in the Antarctic marine system: An emerging area of research[J]. Science of the Total Environment, 2017, 598: 220-227.
- [81] Meyer B, Atkinson A, Bernard K S, et al. Successful ecosystem-based management of Antarctic krill should address uncertainties in krill recruitment, behaviour and ecological adaptation[J]. Communications Earth & Environment, 2020, 1: 28.
- [82] Tarling G A, Ward P, Thorpe S E. Spatial distributions of Southern Ocean mesozooplankton communities have been resilient to long-term surface warming[J]. Global Change Biology, 2018, 24(1): 132-142.
- [83] Stammerjohn S, Massom R, Rind D, et al. Regions of rapid sea ice change: An inter-hemispheric seasonal comparison[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(6): L06501.
- [84] Dätwyler C, Neukom R, Abram N J, et al. Teleconnection stationarity, variability and trends of the Southern Annular Mode (SAM) during the last millennium[J]. Climate

- Dynamics, 2018, 51(5): 2321-2339.
- [85] Henley S F, Schofield O M, Hendry K R, et al. Variability and change in the West Antarctic Peninsula marine system: Research priorities and opportunities[J]. Progress in Oceanography, 2019, 173: 208-237.
- [86] Turner J, Lu H, White I, et al. Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability[J]. Nature, 2016, 535(7612): 411-415.
- [87] Saba G K, Fraser W R, Saba V S, et al. Winter and spring controls on the summer food web of the coastal West Antarctic Peninsula[J]. Nature Communications, 2014, 5: Article No.4318.
- [88] Loeb V J, Santora J A. Climate variability and spatiotemporal dynamics of five Southern Ocean krill species[J]. Progress in Oceanography, 2015, 134: 93-122.
- [89] Thorpe S E, Tarling G A, Murphy E J. Circumpolar patterns in Antarctic krill larval recruitment: An environmentally driven model[J]. Marine Ecology Progress Series, 2019, 613: 77-96.
- [90] Zhu G P. Effects of temporal and environmental factors on the fishing ground of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the northern Antarctic Peninsula based on generalized additive model[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(12): 1863-1871. [朱国平. 基于广义可加模型研究时间和环境因子对南极半岛北部南极磷虾渔场的影响[J]. 水产学报, 2012, 36(12): 1863-1871.]
- [91] Gao D Q. Spatial and temporal variation of Antarctic krill fishery in waters adjacent to the Antarctic Peninsula and its implication on fishery management[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2023. [高得钦. 南极半岛周边海域磷虾渔业时空变动及其对管理的潜在影响[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2023.]
- [92] Ross R M, Quetin L B, Kirsch E. Effect of temperature on developmental times and survival of early larval stages of *Euphausia superba* Dana[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 1988, 121(1): 55-71.
- [93] Brown M, Kawaguchi S, Candy S, et al. Temperature effects on the growth and maturation of Antarctic krill (*Euphausia superba*)[J]. Deep Sea Research II, 2010, 57(7-8): 672-682.
- [94] Nicol S, Stolp M. A refinement of the moult-staging technique for Antarctic krill (*Euphausia superba*)[J]. Marine Biology, 1990, 104: 169-173.
- [95] Yang W J, Xu L X. A review: Research progress on environmental factors affecting resource distribution of Antarctic krill[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2014(3): 316-322. [杨文杰, 许柳雄. 环境因素对南极磷虾资源分布影响的研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2014(3): 316-322.]
- [96] Fedoulov P P, Murhpy E, Shulgovsky K E. Environmental-krill relations in the South Georgia marine ecosystem[J]. CCAMLR Science, 1996, 3: 13-30.
- [97] Parkinson C L. A 40-y record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(29): 14414-14423.
- [98] Turner J, Guarino M V, Arnatt J, et al. Recent decrease of summer sea ice in the Weddell Sea, Antarctica[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(11): e2020GL087127.
- [99] Reygondeau G, Cheung W W L, Wabnitz C C, et al. Climate change-induced emergence of novel biogeochemical provinces[J]. Frontiers in Marine Science, 2020, 7: 657.
- [100] Meredith M P, King J C. Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(19): 1-5.
- [101] Schmidt K, Brown T A, Belt S T, et al. Do pelagic grazers benefit from sea ice? Insights from the Antarctic Sea ice proxy IPSO₂5[J]. Biogeosciences, 2018, 15(7): 1987-2006.
- [102] Nicol S. Krill, currents, and sea ice: *Euphausia superba* and its changing environment[J]. BioScience, 2006, 56(2): 111-120.
- [103] Dai L F, Zhang S M, Fan W. The abundance index of Antarctic krill and its relationship to sea ice and sea surface temperature[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2012, 24(4): 352-360. [戴立峰, 张胜茂, 樊伟. 南极磷虾资源丰度变化与海冰和表温的关系[J]. 极地研究, 2012, 24(4): 352-360.]
- [104] Chen F, Chen X J, Liu B L, et al. Effect of sea ice on the abundance index of Antarctic krill *Euphausia superba*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(4): 495-499. [陈峰, 陈新军, 刘必林, 等. 海冰对南极磷虾(*Euphausia superba*)资源丰度的影响[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(4): 495-499.]
- [105] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E, et al. Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean[J]. Nature, 2004, 432: 100-103.
- [106] Daly K L. Overwintering development, growth, and feeding of larval *Euphausia superba* in the Antarctic marginal ice zone[J]. Limnology & Oceanography, 1990, 35(7): 1564-1576.
- [107] Daly K L, MacAulay M C. Influence of physical and biological mesoscale dynamics on the seasonal distribution and behavior of *Euphausia superba* in the Antarctic marginal

- ice zone[J]. Marine Ecology Progress Series, 1991, 79: 37-66.
- [108] Ryabov A B, de Roos A M, Meyer B, et al. Competition-induced starvation drives large-scale population cycles in Antarctic krill[J]. Nature Ecology & Evolution, 2017, 1(7): Article No.177.
- [109] Meyer B, Fuentes V, Guerra C, et al. Physiology, growth, and development of larval krill *Euphausia superba* in autumn and winter in the Lazarev Sea, Antarctica[J]. Limnology & Oceanography, 2009, 54(5): 1595-1614.
- [110] Hofmann E E, Klinck J M, Locarnini R A, et al. Krill transport in the Scotia Sea and environs[J]. Antarctic Science, 1998, 10(4): 406-415.
- [111] Murphy E J, Watkins J L, Meredith M P, et al. Southern Antarctic circumpolar current front to the northeast of South Georgia: Horizontal advection of krill and its role in the ecosystem[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: 1-10.
- [112] Fach B A, Hofmann E E, Murphy E J. Transport of Antarctic krill (*Euphausia superba*) across the Scotia Sea. Part II: Krill growth and survival[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2006, 53(6): 1011-1043.
- [113] Zhou M, Niiler P P, Zhu Y W, et al. The western boundary current in the Bransfield Strait, Antarctica[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2006, 53(7): 1244-1252.
- [114] Hofmann E E, Hüsrevoglu Y S. A circumpolar modeling study of habitat control of Antarctic krill (*Euphausia superba*) reproductive success[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2003, 50(22-26): 3121-3142.
- [115] Rombolá E F, Franzosi C A, Tosonotto G V, et al. Variability of euphausiid larvae densities during the 2011, 2012, and 2014 summer seasons in the Atlantic sector of the Antarctic[J]. Polar Science, 2019, 19: 86-93.
- [116] Vernet M, Geibert W, Hoppema M, et al. The Weddell gyre, Southern Ocean: Present knowledge and future challenges[J]. Reviews of Geophysics, 2019, 57(3): 623-708.
- [117] Moffat C, Meredith M. Shelf-ocean exchange and hydrography west of the Antarctic Peninsula: A review[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2018, 376(2122): 20170164.
- [118] Li Y J, Li Y, Wei Z X. Study on the properties and exchanges of water masses in the region of Antarctic Peninsula[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(7): 1-13. [李亚婧, 李颖, 魏泽勋. 南极半岛周边海域水团及水交换的研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(7): 1-13.]
- [119] Young E F, Thorpe S E, Renner A H H, et al. Environmental and behavioural drivers of Antarctic krill distribution at the South Orkney Islands: A regional perspective[J]. Journal of Marine Systems, 2024, 241: 103920.
- [120] Tarling G A, Cuzin-Roudy J, Thorpe S E, et al. Recruitment of Antarctic krill *Euphausia superba* in the South Georgia region: Adult fecundity and the fate of larvae[J]. Marine Ecology Progress Series, 2007, 331: 161-179.
- [121] Thompson A F, Heywood K J, Thorpe S E, et al. Surface circulation at the tip of the Antarctic Peninsula from drifters[J]. Journal of Physical Oceanography, 2009, 39(1): 3-26.
- [122] Huneke W G C, Huhn O, Schröder M. Water masses in the Bransfield Strait and adjacent seas, austral summer 2013[J]. Polar Biology, 2016, 39(5): 789-798.
- [123] Delegation of China. Dynamics of the Antarctic krill resource in a fishery hotspot in the Bransfield Strait[R]. Horbat: CCAMLR, SC-CAMLR-43/BG/22, 2024.
- [124] Quetin L B, Ross R M, Fritsen C H, et al. Ecological responses of Antarctic krill to environmental variability: Can we predict the future?[J]. Antarctic Science, 2007, 19(2): 253-266.
- [125] Chen X L, Zhang J C, Wang X L, et al. Contribution of ice algae to carbon sources of Antarctic krill from the southwest Atlantic sector of the Southern Ocean during winter[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2023, 54(4): 1101-1112. [陈晓丽, 张吉昌, 王新良, 等. 冰藻对南大洋大西洋扇区南极磷虾越冬期间碳源的贡献[J]. 海洋与湖沼, 2023, 54(4): 1101-1112.]
- [126] Marrari M, Daly K L, Hu C M. Spatial and temporal variability of SeaWiFS chlorophyll a distributions west of the Antarctic Peninsula: Implications for krill production[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2008, 55(3-4): 377-392.
- [127] Marrari M, Hu C M, Daly K. Validation of SeaWiFS chlorophyll a concentrations in the Southern Ocean: A revisit[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 105(4): 367-375.
- [128] Liu L, Zhang J C, Zhao Y X, et al. Net-phytoplankton communities and influencing factors in the Antarctic Peninsula region in the late austral summer 2019/2020[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1254043.
- [129] Boyd P W, Jickells T, Law C S, et al. Mesoscale iron enrichment experiments 1993-2005: Synthesis and future directions[J]. Science, 2007, 315(5812): 612-617.
- [130] Yoon J E, Yoo K C, MacDonald A M, et al. Reviews and syntheses: Ocean iron fertilization experiments-Past, present, and future looking to a future Korean Iron Fertilization Experiment in the Southern Ocean (KIFES) project[J].

- Biogeosciences, 2018, 15(19): 5847-5889.
- [131] Venables H, Moore C M. Phytoplankton and light limitation in the Southern Ocean: Learning from high-nutrient, high-chlorophyll areas[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: C02015.
- [132] Ross R M, Quetin L B, Baker K S, et al. Growth limitation in young *Euphausia superba* under field conditions[J]. Limnology & Oceanography, 2000, 45(1): 31-43.
- [133] Siegel V. Biology and ecology of Antarctic krill[M]. Cham: Springer, 2016.
- [134] Steinberg D K, Ruck K E, Gleiber M R, et al. Long-term (1993–2013) changes in macrozooplankton off the Western Antarctic Peninsula[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2015, 101: 54-70.
- [135] Hill S L, Phillips T, Atkinson A. Potential climate change effects on the habitat of Antarctic krill in the Weddell quadrant of the Southern Ocean[J]. PLoS One, 2013, 8(8): e72246.
- [136] Lin S Y, Zhao L, Feng J L. Predicted changes in the distribution of Antarctic krill in the Cosmonaut Sea under future climate change scenarios[J]. Ecological Indicators, 2022, 142: 109234.
- [137] Newman S J, Dunlap W C, Nicol S, et al. Antarctic krill (*Euphausia superba*) acquire a UV-absorbing mycosporine-like amino acid from dietary algae[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2000, 255(1): 93-110.
- [138] Newman S J, Ritz D, Nicol S. Behavioural reactions of Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana) to ultraviolet and photosynthetically active radiation[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 2003, 297(2): 203-217.
- [139] McBride M M, Stokke O S, Renner A H H, et al. Antarctic krill *Euphausia superba*: Spatial distribution, abundance, and management of fisheries in a changing climate[J]. Marine Ecology Progress Series, 2021, 668: 185-214.
- [140] Ross R M, Quetin L B, Newberger T, et al. Trends, cycles, interannual variability for three pelagic species west of the Antarctic Peninsula 1993-2008[J]. Marine Ecology Progress Series, 2014, 515: 11-32.
- [141] Azzali M, Kalinowski J. Spatial and temporal distribution of krill *Euphausia superba* biomass in the Ross Sea (1989–1990 and 1994)[M]//Faranda FM, Guglielmo L, Ianora A. Ross Sea Ecology. Cham: Springer, 2000: 433-455.
- [142] IPCC. Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate[H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2019, pp. 3–35. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.001>.
- [143] Hindell M A, Reisinger R R, Ropert-Coudert Y, et al. Tracking of marine predators to protect Southern Ocean ecosystems[J]. Nature, 2020, 580(7801): 87-92.
- [144] CCAMLR. Report of the 40th Meeting of the Scientific commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources[R]. Hobart: CCAMLR, 2021.
- [145] CCAMLR. Report of the 41st Meeting of the Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources[R]. Hobart: CCAMLR, 2022.
- [146] CCAMLR. Report of the 42nd Meeting of the Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources[R]. Hobart: CCAMLR, 2023.
- [147] CCAMLR. Report of the 43rd Meeting of the Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources[R]. Hobart: CCAMLR, 2024.

Research progress on the impact of environmental factors on Antarctic krill resources and fishery dynamics

ZHAO Yunxia,^{1,2}, WANG Xinliang^{1,2}, YING Yiping^{1,2}, ZHU Jiancheng^{1,2}, LIU Lu^{1,2}, LI Wenxiong³, ZHAO Xianrong^{1,2}

1. Key Laboratory of Sustainable Development of Polar Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;
2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China;
3. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai, 201306, China

Abstract: Antarctic krill (*Euphausia superba*) is a key species in the Southern Ocean ecosystem, playing a crucial role in maintaining ecological balance and biodiversity, and is also an important polar fishing resource. Managing Antarctic krill resources is crucial for ensuring the health of global marine ecosystems and promoting the sustainable development of the fishing industry. A large number of krill resource surveys and assessments have been continuously conducted to accurately assess the spatiotemporal distribution of krill resources. The distribution and variability of Antarctic krill resources are closely related to environmental factors in the Southern Ocean. In the context of climate change, the Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR), an intergovernmental organization, has also accelerated the development of new management mechanisms for the Antarctic krill fishery. This study summarizes the current assessment of Antarctic krill resources and fishery development. We concentrated on the research progress of the impact of major environmental factors on the temporal and spatial distribution of Antarctic krill resources and fishery, such as seawater temperature, sea ice, currents, water masses, fronts, food, and ultraviolet and visible light, and focused on elucidating the impact of physical environmental factors on the physiological functions of krill, early larval recruitment, resource transport and retention, and other key functions and processes. We found that fluctuations of the water temperature directly affect the physiological functions and distribution of krill, the cyclical changes in sea ice affect the survival of krill larvae and population recruitment, the structure of currents plays a key role in the transport and distribution of krill, changes in water masses and fronts also affect the retention and migration of krill populations, and seasonal changes in food concentration directly affect the reproductive capacity and growth rate of krill. In addition, other environmental factors such as ultraviolet radiation and light cycles also impact krill. This study provides an outlook for future research on the distribution of krill resources and the sustainable development of fisheries in the context of climate change. It offers references for subsequent research, such as the impact of environmental factors on the ecological habits of krill, the construction of circumpolar resource monitoring techniques, and the formulation of krill fishery management strategies.

Key words: Antarctic krill; resource; fishery; environmental factors; climate change, Antarctic

Corresponding author: ZHAO Yunxia. E-mail: zhaoyx@ysfri.ac.cn