



海冰与风场对布兰斯菲尔德海峡磷虾渔场作业适宜性的影响

朱宇航¹, 卓梦婷^{1,2,3}, 朱国平^{1,4,5,6}, 董思宋^{1,4}, 沈心仪¹,
张春玲^{1,7}, 程灵巧^{1,4,7}, 胡松^{1,4,7*}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 中国科学院南海海洋研究所, 热带海洋环境国家重点实验室, 广东广州 510301;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 上海海洋大学, 极地研究中心, 上海 201306;

5. 上海海洋大学, 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室极地海洋生态系统研究室, 上海 201306;

6. 上海海洋大学, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;

7. 上海海洋大学, 海洋科学与技术实验教学示范中心, 上海 201306)

摘要: 全球变暖越来越受到人们的关注, 南极海冰和风场作为气候变化的关键因子, 显著影响着渔船作业的安全及经济效率。相较于连续泵吸捕捞渔船, 我国普遍采用传统渔船开展南极磷虾捕捞作业, 该作业易受到外界环境的影响。本实验针对磷虾捕捞作业的适应性, 基于 1989—2020 年美国国家冰雪中心海冰密集度数据及欧洲中期天气预报中心风场数据, 获得气候变化下南极海洋生物资源养护委员会 (CCAMLR) 48.1 亚区的南极布兰斯菲尔德海峡海冰密集度和风场的分布及变化趋势。结果显示, 在全球变暖背景下, 处于布兰斯菲尔德海峡的海冰和风速均呈减小趋势, 较 CCAMLR 48.2、48.3、48.4 亚区, 48.1 亚区更适宜磷虾渔业捕捞作业。结合作业船位分布, 渔船作业区域主要集中在布兰斯菲尔德中部海盆 (CB) 和东部海盆 (EB) 区域海冰密集度为 0.15~0.2、较大风力 (风力等级达 6 级及以上) 天数在 50~70 d 的区域。1989—2020 年海冰与风场对适宜作业天数的影响表现: 区域内海冰影响下的适宜作业天数 (海冰密集度 < 0.2 的天数) 有所增加, 风场影响下的适宜作业天数 (风力等级达 6 级以下的天数) 减少。研究区域风力等级较低, 相比之下, 海冰对传统渔船作业的适宜性起主导作用。研究表明, 未来传统渔船适宜作业天数将呈增加趋势, 但海冰及风力的变化引起磷虾资源的变动需要在今后研究中予以考虑。

关键词: 南极磷虾; 海冰; 风场; 拖网渔业; 渔场; 布兰斯菲尔德海峡

中图分类号: S 931

文献标志码: A

南极磷虾 (*Euphausia superba*, 以下简称磷虾), 通常指南极大磷虾, 是地球上资源量最大的单种生物之一^[1], 呈环南极分布^[2]。磷虾作为南极海洋生态系统中的关键物种^[2], 是维持整个南大

洋生态系统运转的驱动力。磷虾是南大洋规模最大的渔业捕捞对象, 具有重要的经济价值。我国自 2010 年开始磷虾探捕, 磷虾渔业现已成为我国远洋渔业的重要组成部分^[3]。南极环境条件非常

收稿日期: 2021-12-20 修回日期: 2022-01-11

资助项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1406801); 国家自然科学基金 (41776185); 中科院国际合作重点项目 (183611KY5B20200059)

第一作者: 朱宇航 (照片), 从事物理海洋学研究, E-mail: zhuyuhang12356@126.com

通信作者: 胡松, 从事海洋生态系统动力学研究, E-mail: shu@shou.edu.cn



苛刻,海冰及风场变化极为显著,这为磷虾渔业的开展带来了较大的挑战和风险。因此,研究环境变化对磷虾资源及捕捞的影响具有重要战略意义。

布兰斯菲尔德海峡位于南设得兰群岛及南极半岛之间(61~64°S, 54~62°W)^[4],为一个半封闭海域。海峡呈NE—SW走向,东部连通威德尔海和大西洋,西南连通太平洋,是沟通大西洋和太平洋的重要水道。该区域磷虾资源极为丰富^[5],近年来已逐渐成为磷虾渔业的重要作业区域之一^[1]。但总的来说,对于布兰斯菲尔德海峡内磷虾渔场的气象条件及海冰分布特征的研究较为有限。

南极地区的海冰及风场的分布存在着区域差异性,多变的环境对南极的影响越来越显著^[6],这对于我国日益发展的磷虾渔业提出了明显的挑战。2—5月是磷虾渔业的渔汛期^[7],我国渔船每年均前往布兰斯菲尔德海峡进行捕捞作业。但即使该区域磷虾资源丰富,恶劣的气象条件仍会降低渔业捕捞的有效作业时间,影响渔业的经济效率^[8],也增加了渔船捕捞作业时的安全风险^[9]。一方面,海冰影响着渔船的捕捞作业时间和范围^[10],冬季渔船易受海冰面积扩大的影响而难以正常作业^[7]。另一方面,风速大小影响着渔船的作业效率^[11],大风过程产生的风浪是影响渔船作业的主要因素之一^[12]。尤其,我国普遍采用传统单船中层拖网开展磷虾渔业生产^[13],这种瞄准捕捞的作业方式以及相对较老的船龄受天气条件的约束更为严重。鉴于海冰、风场的变化及其不可预测性对磷虾捕捞效率、作业安全、管理规划等均带来了影响。因此,针对以传统渔船捕捞作业的我国磷虾渔业,开展了布兰斯菲尔德海峡内风场及海冰的区域性特征分析以及风场及海冰变化对磷虾渔船作业带来的影响研究。相关结果可为了解我国磷虾重要渔场的环境条件提供基础数据,并为磷虾渔业的海上生产以及渔业企业的作业规划提供参考。

1 数据与方法

1.1 实验数据

为统计渔业数据,联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)将48区划分为6个亚区。南极半岛附近南极海洋生物资源养护委员会(Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR)48.1~48.4亚区是磷虾渔业

的主要渔场。本研究对南极半岛附近4个亚区的海冰和风速进行多年趋势分析,以预测磷虾渔场的作业适宜性。本研究按照地理位置由西往东将处于48.1亚区的布兰斯菲尔德海盆分为3个区域:海盆西部(west basin, WB)区域、海盆中部(central basin, CB)区域、海盆东部(east basin, EB)区域(图1),以2020年为例,总结这3个区域作业时间和作业船位的分布规律。

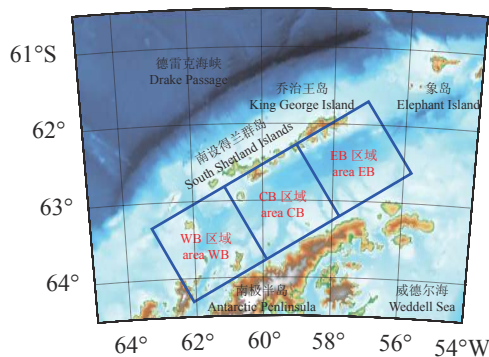


图1 研究区域图

Fig. 1 Map of the study area

海冰密集度数据来自美国国家冰雪中心^[14](National Snow and Ice Data Center, NSIDC; <https://nsidc.org>),该数据集提供了根据美国国家海洋与大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)气候数据记录程序标准^[15]得出的海冰密集度估算值。本研究使用1989—2020年南极每日和每月的海冰密集度数据,空间分辨率均为25 km × 25 km,时间分辨率分别为天和月。其中,日平均海冰密集度数据缺失1994年3月24日的数据。

风场数据来自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF; <https://www.ecmwf.int>)的ERA5数据集,该数据集由ECMWF的哥白尼气候变化服务^[16](Copernicus Climate Change Service, C3S; <https://cds.climate.copernicus.eu>)平台提供,为过去4—7年针对全球气候和天气的第五代ECMWF再分析数据集。ERA5数据集替代了传统的ERA-Interim再分析数据集。本研究使用1989—2020年研究区域每小时和每月的距地面10 m高度处的经向风和纬向风数据,空间分辨率均为0.25° × 0.25°,时间分辨率为小时和月。

磷虾渔业数据来自中国水产有限公司“龙腾”轮和“龙发”轮、辽宁远洋渔业有限公司“福荣海”轮磷虾拖网渔船2019—2020年位于南极半岛北部

的作业记录, 内容包括作业船位、作业时间、渔获量、网位、风力和风向等。

1.2 分析方法

海冰密集度为海冰面积占海域面积的百分比, 取值为 0~1。本研究采用 0.15 海冰密集度值作为临界值区分有冰区和无冰区^[17]。根据现场作业情况和生产经验, 以海冰密集度小于 0.2 为传统渔船适宜作业的海冰环境, 分析 WB、CB 和 EB 这 3 个区域 2020 年传统渔船的适宜作业天数; 依据风力参照等级对照表^[18], 以 6 级平均风力为参考, 认为当平均风力大于 6 级时传统渔船不适宜作业。采用线性最小二乘法^[19]对数据进行趋势分析, 本研究提取拟合斜率作为多年增减趋势, 对 1989—2020 年布兰斯菲尔德海峡海冰、风速、海冰或风速影响下的适宜天数进行多年趋势分析, 以预测磷虾渔场的作业适宜性。

2 结果

2.1 2019—2020 年作业船位分布

海冰密集度 1989—2020 年总体上海冰分布在 61.5°S 以南, 由南向北逐渐减少, 东侧海冰密集度高 (图 2)。30 年内总体平均海冰范围界线西侧最北至 63.7°S 左右, 东侧最北至 61.5°S 附近。界线中间穿过布兰斯菲尔德海峡, 穿过 CB、EB

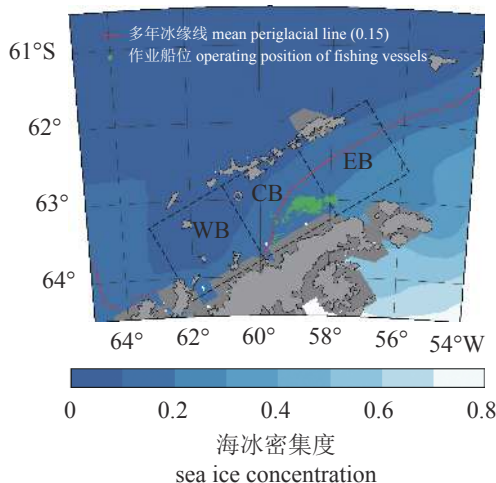


图 2 1989—2020 年南极半岛平均海冰密集度及 2019—2020 年磷虾渔船作业船位分布

Fig. 2 Distribution of average sea ice concentration in the Antarctic Peninsula from 1989 to 2020 and operating position of krill fishing vessels in Bransfield Strait from 2019 to 2020

区域, 未穿过 WB 区域。在平均水平上, 布兰斯菲尔德海峡处于海冰变化的边界区域, 总体上海冰密集度较低。WB 区域海冰密集度处于 0.15 以下, 为不结冰的状态; CB 区域海冰密集度为 0~0.2, 有 50% 区域的海冰处于 0.15 以上; EB 区域存在海冰密集度在 0.2 以上的区域, 大部分区域海冰处于 0.15 以上。结合 2019—2020 年的作业船位, 渔船作业区域主要集中在 CB、EB 区域海冰密集度为 0.15~0.2 的区域。

较大风力天数 以月为单位, 统计 1989—2018 年布兰斯菲尔德海峡区域较大风力 (6 级及以上风力) 天数 (图 3)。多年平均较大风力天数大体上以南极半岛向外逐渐增多, 由 0 逐渐增至 111 d。在 EB 区域乔治王岛东侧也有一个较大风力天数的低值区, 最低天数在 21 d 左右。WB 区域较大风力天数最少, 为 0~90 d; EB 区域较大风力天数最多, 天数大体上在 55 d 以上, 多年平均风力较大。结合 2019—2020 年的作业船位, 渔船作业区域主要集中在 CB、EB 区域较大风力天数在 50~70 d 的区域, 较大风力天数适中。

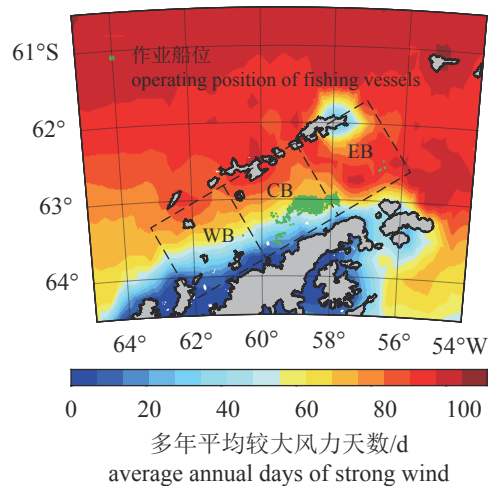


图 3 1989—2020 年布兰斯菲尔德海峡区域较大风力 (6 级及以上风力) 平均天数及 2019—2020 年作业船位分布

Fig. 3 Average day distribution of strong wind (Beaufort scale level 6 and above) in the Antarctic Peninsula from 1989 to 2020 and operating position of krill fishing vessels in Bransfield Strait from 2019 to 2020

2.2 2020 年作业时间特征

以天为单位, 得到 2020 年布兰斯菲尔德海峡区域作业时间与海冰密集度和风速的关系 (图 4)。

2020年,布兰斯菲尔德海峡区域海冰总体上由6月开始结冰,直至11月海冰消融。3个区域均在接近2020年9月1日时达到最高海冰密集度,海冰密集度超过0.71。2020年10月1日左右达到海冰密集度的第2个峰值,海冰密集度超过0.41。

对比WB、CB、EB这3个区域的平均海冰密集度,发现WB区域海冰最少,海冰8月中旬才开始出现,10月底就已消失;而EB区域海冰最多,海冰密集度最高出现在2020年9月3日,达0.84。

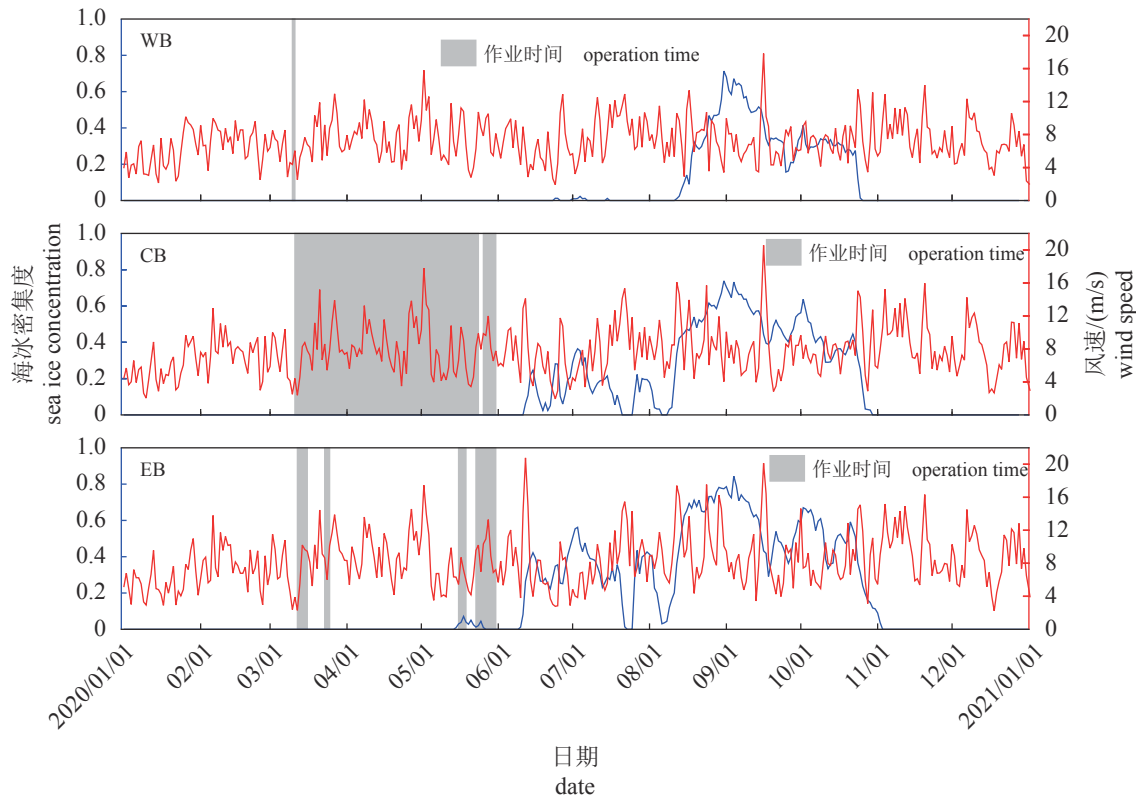


图4 2020年布兰斯菲尔德海峡区域作业时间与海冰密集度和风速的关系

Fig. 4 Relationship between operation time of fishing vessels and sea ice concentration and wind speed in Bransfield Strait in 2020

2020年,布兰斯菲尔德海峡的平均风速为7.9 m/s (4级和风),一年中大部分时间平均风力等级均处于6级以下。其中,WB、CB和EB区域风力等级达6级及以上的天数分别为30、56和74 d。EB区域总体上风速较大,最大风速达20.8 m/s (9级烈风)。WB、CB和EB这3个区域一年中风速最高的2次约出现在2020年5月1日及9月中旬,4—10月风速较大的天数较多。

以2020年实际渔船作业时间为例,WB区域仅在2020年3月10日进行作业。2020年3月11日—2020年5月30日渔船在CB区域作业,其中2020年5月24日—2020年5月25日作业中断。EB区域作业的时间为2020年3月12日—2020年5月30日。渔船一般由WB区域进入布兰斯菲尔德海峡,主要在CB区域进行作业,期间在CB和EB区域穿梭作业。

结合渔捞日志和环境数据可以发现,2020年作业时间为3—5月,作业区域主要集中在CB区域。对于海冰情况而言,该时段WB和CB区域均不存在海冰,仅EB区域存在部分海冰,且海冰密集度低于0.2。对于风力情况而言,3月中旬—4月初存在较大风力,CB和EB区域内风力达7级。约在2020年5月1日出现作业时间内的最大风力,CB和EB区域内最高风力达8级。总体而言,作业时间内3个区域均为不结冰或低冰情况,仅部分天数部分时段风力较大,其海冰和风场的情况均基本适宜渔船作业,且WB区域海况略优于CB和EB区域。

2.3 1989—2020年海冰特征

海冰密集度的变化趋势 总体上,南极半岛附近区域海冰密集度的趋势为 $-2 \times 10^{-4} \sim -4 \times 10^{-4}$ /月

(图 5)。其中, CCAMLR 48.1 和 48.2 亚区中的海冰密集度既有增大的趋势, 也有减小的趋势, 且部分区域海冰变化趋势较为显著, 接近最大趋势值 4×10^{-4} /月; CCAMLR 48.3 和 48.4 亚区趋势值较小, 海冰变化水平较小。处于布兰斯菲尔德海峡的 WB、CB、EB 3 个区域海冰呈现较弱的减小趋势, 有利于渔船进行磷虾捕捞作业。

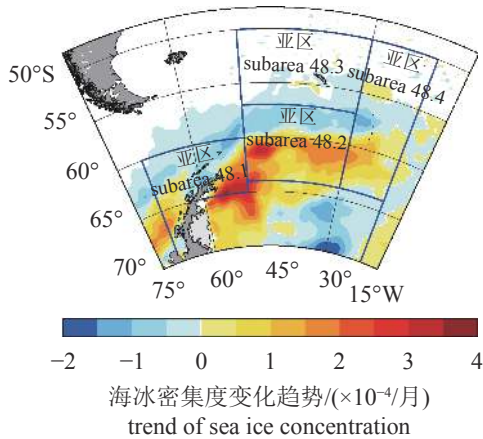


图 5 1989—2020 年布兰斯菲尔德海峡海冰密集度变化趋势

Fig. 5 Trend of variation in sea ice concentration in Bransfield Strait from 1989 to 2020

海冰影响下的适宜作业天数 WB、CB 和 EB 这 3 个区域近 32 年来海冰影响下的适宜作业天数均呈增加趋势, 且适宜作业天数的增加及减少的年份基本一致 (图 6)。适宜作业天数平均为每年 273.84 d, 约占 75.02%, 最少为 159 d。总体来看, WB 区域适宜作业天数较 CB 和 EB 区域多, CB 和 EB 区域处于同一水平 (表 1)。WB、CB 和 EB 区域 32 年内海冰影响下的适宜作业天数增加趋势分别为 0.51、0.80 和 0.67 d/a。其中, WB 区域平均每年适宜作业天数最多, 为 297.47 d; EB 区域最少, 每年仅有 254.22 d 适宜捕捞作业。由此可以看出, 1989—2020 年, 海冰影响下的适宜作业天数有所增加。WB 区域适宜作业天数平均

水平最高, 但 CB 区域适宜作业天数的增加趋势最为显著。因此, 由海冰密集度可看出, 研究区域仍适于未来开展磷虾作业, 在短期内 WB 区域仍更适宜作业。

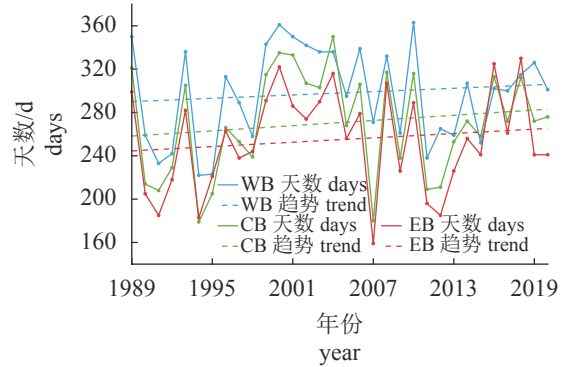


图 6 1989—2020 年布兰斯菲尔德海峡海冰影响下的适宜作业天数时间序列图

Fig. 6 Time series of suitable operation days for krill fishing under the influence of sea ice in WB, CB and EB of Bransfield Strait from 1989 to 2020

2.4 1989—2020 年风场特征

风速的变化趋势 总体上, 南极半岛附近区域风速的趋势为 $-1.6 \times 10^{-3} \sim 1.6 \times 10^{-3}$ (m/s)/月 (图 7)。其中, 48.1 亚区中的风速以减小为主, 存在着最小的趋势值, 接近 -1.6×10^{-3} (m/s)/月; 48.2 亚区风速既有增大的趋势, 也有减小的趋势, 变化趋势相对较小; 48.3 和 48.4 亚区的风速变化均为增大趋势, 且风速变化水平较大。WB、CB 和 EB 这 3 个区域的风速整体上呈现较弱的减小趋势, 仅较小的部分区域呈较弱的增大趋势。

风场统计 1989—2020 年布兰斯菲尔德海峡内 WB、CB 和 EB 3 个区域风向均以偏西风为主 (图 8), 风向集中在 SW—NW, 有超过一半的风向处于这个区间, 最大风速为 28.7 m/s (11 级暴风), 平均风速为 7.77 m/s (4 级和风)。每个风向的风速所占比例较为一致, 中间风速所占比例较大。

表 1 布兰斯菲尔德海峡 WB、CB 和 EB 3 个研究区域海冰影响下的适宜作业天数比较
Tab. 1 Comparison of suitable operation days for krill fishing under the influence of sea ice in WB, CB and EB of Bransfield Strait

区域 region	平均天数/d mean days	趋势值/(d/a) trend	R 值 R value	P 值 P value	标准差 SD	最大天数/年份 max days/year	最小天数/年份 min days/year
WB	297.47	0.51	0.11	0.55	43.45	363/2010	222/1994
CB	269.84	0.80	0.16	0.39	47.99	350/2004	179/1994
EB	254.22	0.67	0.14	0.45	45.84	330/2018	159/2007

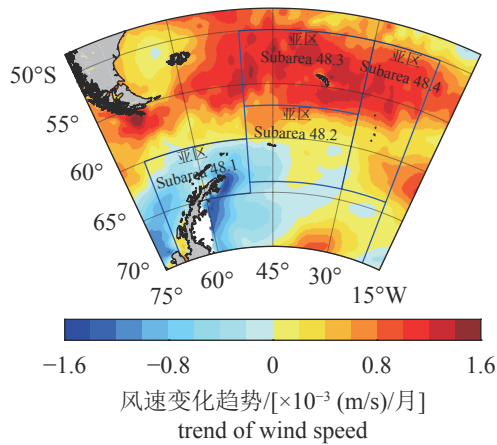


图7 1989—2020年布兰斯菲尔德海峡风速变化趋势
Fig. 7 Trend of variation in wind speed in Bransfield Strait from 1989 to 2020

风向频率较高时，出现较大风速的情况较多。其中，WB区域与CB、EB区域不同，除了西和西南(W、WSW)风向占比大之外，东北风向(ENE、NE)所占比重也很大。CB区域风向集中在WSW及W方向，分别占有所有风向的15.91%及16.21%。EB区域风向集中在WSW—NW方向之间，W方向频率最高，占有所有风向的16.24%。EB区域的平均风速较WB、CB区域大，为8.34 m/s。这32年内达到两次28.7 m/s的最大风速，均为SSE风向。

与WB、CB区域3~5级风力占比最高不同的是，EB区域4~6级风力占比最高，为66.16%。5级风力出现频率最高，占24.94%，其次是4级和6级风力。因此，1989—2020年布兰斯菲尔德海峡区域风向以偏西为主，风力等级基本上均在6级及以下。

风场影响下的适宜作业天数 除EB区域的风场影响下的适宜作业天数(风力等级达6级以下的天数)为增加趋势外，1989—2020年WB、CB区域风场影响下的适宜作业天数均呈减少趋势(图9)。风场影响下的适宜作业天数在WB区域的

变化趋势为每年0.17 d，为较弱的减少趋势(表2)；CB区域的减少趋势为每年0.35 d，减少趋势较强；EB区域为每年增加0.03 d。32年内，6级、7级和8级风力天数平均分别为每年48.30、10.81和0.78 d。其中，6级风力天数的变动趋势最为显著。

就风力而言，1989—2020年布兰斯菲尔德海峡风力等级达6级及以上的天数较少，基本适宜进行捕捞作业。EB区域风场影响下的适宜作业天数平均水平较低，处于增加趋势；WB、CB区域的适宜作业天数平均水平较高，处于较弱的减少趋势。

3 讨论

本研究基于1989—2020年美国国家冰雪中心海冰密集度数据及欧洲中期天气预报中心风场数据，分析了南极布兰斯菲尔德海峡内部海域海冰和风场的分布及趋势变化情况。并结合渔业数据，基于作业时间和作业船位的分布规律，分析了海冰与风场对于传统渔船未来作业的适宜性。

3.1 海冰和风场的气候变化趋势及影响

以2020年为例，布兰斯菲尔德海峡区域海冰总体上由6月开始结冰，直至11月海冰消融，海峡内海冰属于一年冰^[20-21]。WB、CB和EB3个区域均在接近2020年9月1日时达到最高海冰密集度，与以往的研究较为一致，南极海冰密集度2月最低，9月最高^[22-23]。该区域2020年的平均风速为7.9 m/s(4级和风)，一年中大部分时间平均风力等级均处于6级以下。其中，WB区域风速较CB和EB区域低，而EB区域总体上风速较高，最大风速达20.8 m/s(9级烈风)。WB、CB和EB3个区域一年中最高风速的2次分别出现在2020年5月1日及9月中旬。许淙等^[24]研究表明，2002—2003年东南极附近的中山站的年风速为

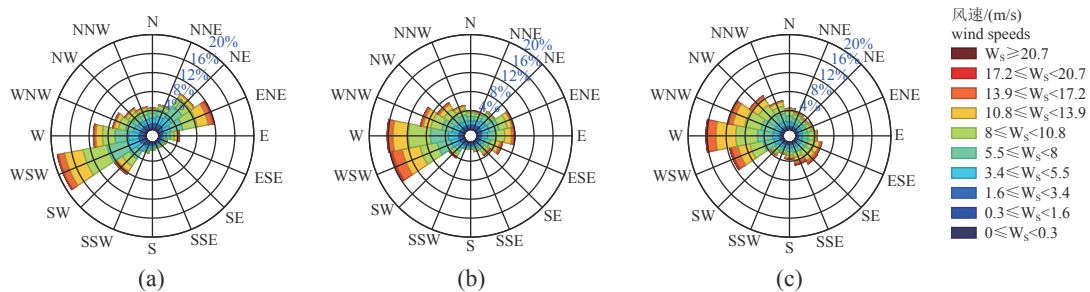


图8 1989—2020年布兰斯菲尔德海峡WB、CB和EB3个研究区域风速风向统计

Fig. 8 Wind speed and direction statistics of WB, CB and EB in Bransfield Strait from 1989 to 2020

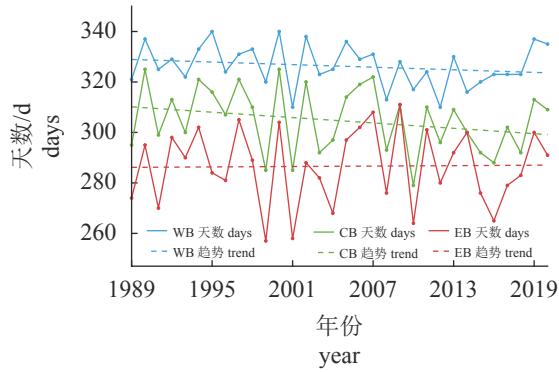


图 9 1989—2020 年布兰斯菲尔德海峡风场影响下的适宜作业天数时间序列

Fig. 9 Time series of suitable operation days of strong wind (Beaufort scale level 6 and below) in Bransfield Strait from 1989 to 2020

6~8 m/s, 全年盛行 NE—ENE 风向, 这与布兰斯菲尔德海峡的风场特征不同。很明显, 布兰斯菲尔德海峡内的风力要高于东南极中山站附近, 这也说明开展当地风场分析对于磷虾渔业而言更为重要。

1989—2020 年布兰斯菲尔德海峡区域海冰影响下的适宜作业天数有所增加。其中, WB 区域适宜作业天数平均水平最高, 但 CB 区域适宜作业天数的增加趋势最为显著。产生此种现象的原因可能是不断上升的海表温度^[6]及短周期气候振荡现象^[25], 这使得渔船在布兰斯菲尔德海峡能够有更长的作业时间、更大的作业范围。同样的, 风场对适宜作业天数有一定的影响。1989—2020 年, WB、CB 和 EB 3 个区域风向均以偏西风为主, 集中在 SW—NW, 平均风速为 7.77 m/s。海峡风力等级达 6 级及以上的天数较少, 基本适宜进行捕捞作业。EB 区域风场影响下的适宜作业天数平均水平较低, 处于增加趋势; WB、CB 区域适宜作业天数平均水平较高, 处于较弱的减少趋势。同时, 陈洵子等^[26]对布兰斯菲尔德海峡进行评估, 表明 2007—2011 年南极磷虾适宜栖息地主要位于

布兰斯菲尔德海峡中部, 这与目前适应的渔业作业区域保持一致。

在全球变暖的背景下, 处于 CCAMLR 48.1 亚区的布兰斯菲尔德海峡的海冰和风速均呈减小趋势, 较 CCAMLR 48.2、48.3 和 48.4 亚区更适宜进行磷虾捕捞作业。由海冰密集度看, 研究区域仍适于未来开展磷虾渔业作业。布兰斯菲尔德海峡紧邻存在绕极气旋的德雷克海峡^[27], 气旋的变化可能导致风向、风速发生变化。较大风力天数趋势以增加为主, 相对来说会减少未来传统渔船适宜作业天数。

由于研究区域风力等级本身比较低, 对于捕捞作业的影响比较小, 相比之下, 研究区域传统渔船适宜作业天数受海冰的影响更大。因此, 结合 32 年布兰斯菲尔德海峡内部海冰和风场的分布、趋势变化情况及它们对传统渔船捕捞作业的影响, 认为未来传统渔船适宜作业天数将呈增加趋势。基于此, 本研究建议, 开展布兰斯菲尔德海峡内磷虾资源变动及其渔场形成机制研究对于维持我国磷虾渔业的可持续发展非常重要, 尤其是在目前南极海洋保护区推进^[28-29]以及磷虾渔业自愿限制区 (voluntary restriction zones, VRZ) 等相关过程不断影响该渔场的背景下。

3.2 渔场和渔船作业因素讨论

南极磷虾捕捞作业时间、区域及效率由多方面因素决定^[11,30-31]。结合渔业数据可以发现, 2020 年布兰斯菲尔德海峡渔场作业时间为 3—5 月。最近几年, 我国大部分渔船在 7—10 月转产至 CCAMLR 48.3 亚区进行作业。磷虾渔业最重要的渔场集中在南极半岛周边水域 (48.1 亚区)。但自 2019 年起, 磷虾渔业 VRZ 设立, CCAMLR 48.1 亚区内产量下降, 渔场分布重心逐渐向布兰斯菲尔德海峡内移动。

由作业时间及船位分布看出, 渔船在 WB、CB 和 EB 这 3 个区域内存在作业时间的中断。就平均海冰密集度而言, 这个时间段 WB、CB 区域

表 2 布兰斯菲尔德海峡 WB、CB 和 EB 3 个研究区域风场影响下的适宜作业天数比较

Tab. 2 Comparison of suitable operation days for krill fishing under the influence of wind field in WB, CB and EB of Bransfield Strait

区域 region	平均天数/d mean days	趋势值/(d/a) trend	R 值 R value	P 值 P value	标准差 SD	最大天数/年份 max days/year	最小天数/年份 min days/year
WB	326.44	-0.17	0.19	0.29	8.35	340/1995,2000	310/2001,2012
CB	305.00	-0.35	0.26	0.16	12.99	325/1990,2000	279/2010
EB	286.56	0.03	0.02	0.92	14.99	311/2009	257/1999

均不存在海冰,仅EB区域存在部分海冰,且海冰密集度低于0.15。渔船作业区域主要集中在CB、EB区域平均海冰密集度为0.15~0.2的区域。近30年来,海峡内结冰月份普遍延迟^[21],有利于磷虾的捕捞作业。由渔捞日志可发现,其原因是渔船受到海冰和风场的影响转移至相邻的区域作业。渔船一般由WB区域进入布兰斯菲尔德海峡,主要在CB区域进行作业,期间在CB、EB区域穿梭作业。近年来,磷虾渔业产量呈逐年上升趋势,离开布兰斯菲尔德海峡的原因主要是触发了CCAMLR 48.1 亚区捕捞配额。

渔船作业容易受到海浪的影响,而海浪很大程度上由风场所驱动。在月初及月末海浪比较大,这可能是受潮汐的影响^[4]。平均风力等级大小主要影响着磷虾捕捞的作业连续性。平均风力等级大,瞬时风力大的概率比较高,容易造成磷虾捕捞作业的中断。磷虾作业中断,受海流等各种因素的影响,可能导致渔船丢失原先目标虾群,需要浪费更多的时间用以重新寻找虾群。这会导致渔船有效作业时间进一步缩短,也不利于渔船捕捞的产量及作业效率。风力等级大小还影响着渔船的拖网拖向,风力等级较大时,渔船会采取顶风作业的方式以保证作业的安全,且固定的拖向在某种程度上也影响了渔船的作业效率^[11]。在环境较为恶劣的时候,渔船每隔3~4 d就有可能要停止作业一次。在作业时间内,3月中旬—4月初有较大风力,在CB和EB区域内达7级风力。渔船作业区域主要集中在CB和EB区域较大风力天数在50~70 d的区域。

由于连续泵吸渔船相比传统拖网渔船有着更高的抗风浪等级,在冰区作业也有明显优势。因此为了减少未来海冰和风场对于磷虾渔业的影响,大力发展连续泵吸渔船可以使得磷虾渔业有着更长的适宜作业时间以及更大的适宜作业范围。除此之外,提升南极海域环境预报水平也更有利于磷虾渔船合理地安排作业时间和区域,提高渔船生产效率及安全性。数十年来,随着气候的变化,许多原本不适宜渔业生产的区域逐渐成为目前磷虾渔业的重要渔场,因此未来对于新渔场的开发和探索也是促进磷虾渔业发展的关键。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

[1] 朱国平,杨洋,王芮,等.采用声学方法研究2016年秋
<https://www.china-fishery.cn>

季布兰斯菲尔德海峡南极磷虾群昼夜垂直移动特征及其影响因素[J].水产学报,2018,42(10):1541-1549.

Zhu G P, Yang Y, Wang R, et al. Diel vertical migration of Antarctic krill (*Euphausia superba*) swarm in the Bransfield Strait during austral autumn 2016 inferred from acoustic data and its relations to environmental factors[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(10): 1541-1549 (in Chinese).

[2] 万树杰,朱国平.2018年夏季南奥克尼群岛南极磷虾资源丰度多尺度空间异质性[J].水产学报,2021,45(5):716-725.

Wang S J, Zhu G P. Multi-scale analysis on spatial heterogeneity for abundance of Antarctica krill (*Euphausia superba*) in the South Orkney Islands in summer 2018[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(5): 716-725 (in Chinese).

[3] 朱国平.南极磷虾种群生物学研究进展 I—年龄、生长与死亡[J].水生生物学报,2011,35(5):862-868.

Zhu G P. Population biology of Antarctic krill *Euphausia superba*. I—age, growth and mortality[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2011, 35(5): 862-868 (in Chinese).

[4] 周相乾,胡松,张瑜.南极布兰斯菲尔德海峡正压潮数值模拟[J].极地研究,2019,31(1):56-68.

Zhou X Q, Hu S, Zhang Y. Numerical simulation of barotropic tide in the Bransfield Strait, Antarctica[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2019, 31(1): 56-68 (in Chinese).

[5] 樊伟,伍玉梅,陈雪忠,等.南极磷虾的时空分布及遥感环境监测研究进展[J].海洋渔业,2010,32(1):95-101.

Fan W, Wu Y M, Chen X Z, et al. Progress in spatio-temporal distribution of Antarctic krill and environment survey of remote sensing[J]. Marine Fisheries, 2010, 32(1): 95-101 (in Chinese).

[6] Clem K R, Fogt R L, Turner J, et al. Record warming at the South Pole during the past three decades[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(8): 762-770.

[7] 张衡,张瑛瑛,王雪辉,等.南极磷虾中层拖网捕捞参数对CPUE变动的影响[J].海洋渔业,2019,41(3):312-321.

Zhang H, Zhang Y Y, Wang X H, et al. Effects of fishing coefficients of mid-water trawler on CPUE in Chinese Antarctic krill fishery[J]. Marine Fisheries,

- 2019, 41(3): 312-321 (in Chinese).
- [8] 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.
Zhao X Y, Zuo T, Leng K L, *et al.* Engineering science and technology challenges in the Antarctic krill fishery[J]. *Engineering Science*, 2016, 18(2): 85-90 (in Chinese).
- [9] 张红漓. 基于北斗卫星系统港口船位数据的拖网规划方法[J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(18): 208-210.
Zhang H L. Research on trawl planning method of port ship position data based on Beidou satellite system[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(18): 208-210 (in Chinese).
- [10] 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.
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 (in Chinese).
- [11] 陈明鑫, 许柳雄, 唐浩, 等. 基于多元变量的南极磷虾拖网作业状态影响因素分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(1): 144-154.
Chen M X, Xu L X, Tang H, *et al.* Factors influencing the trawling status of Antarctic krill fishery based on multivariate analysis[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(1): 144-154 (in Chinese).
- [12] 刘旺, 胡松. 南乔治亚岛2016年冬季大风天气特征分析[J]. *极地研究*, 2018, 30(1): 42-49.
Liu W, Hu S. Analysis of the characteristics of winter gales near the South Georgia Islands in 2016[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2018, 30(1): 42-49 (in Chinese).
- [13] 岳冬冬, 王鲁民, 黄洪亮, 等. 我国南极磷虾资源开发利用技术发展现状与对策[J]. *中国农业科技导报*, 2015, 17(3): 159-166.
Yue D D, Wang L M, Huang H L, *et al.* Status of development and countermeasures on utilization technology of Antarctic krill resources in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2015, 17(3): 159-166 (in Chinese).
- [14] Meier W, Fetterer F, Duerr R, *et al.* NOAA/NSIDC climate data record of passive microwave sea ice concentration, version 3[EB/OL]. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2019 [2020-06-01].<https://doi.org/10.7265/N59P2ZTG>.
- [15] National Research Council. Climate data records from environmental satellites: interim report[M]. Washington, D. C. : The National Academies Press, 2004: 150.
- [16] ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present[EB/OL]. 2018 [2021-03-01]. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>.
- [17] Pang X P, Pu J, Zhao X, *et al.* Comparison between AMSR2 sea ice concentration products and pseudo-ship observations of the arctic and Antarctic sea ice edge on cloud-free days[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 317.
- [18] 中国气象局. 台风业务和服务规定 [M]. 北京: 气象出版社, 2012: 93.
China Meteorological Administration. Typhoon business and service regulations[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012: 93 (in Chinese).
- [19] Greene C. Trend[EB/OL]. 2014 [2020-09-02]. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46363-trend>.
- [20] 王星东, 代文浩. 基于1997—2017年遥感数据的南极海冰时空变化分析[J]. *海洋预报*, 2020, 37(3): 91-97.
Wang X D, Dai W H. Analysis of temporal and spatial changes of Antarctic sea ice based on remote sensing data from 1997 to 2017[J]. *Marine Forecasts*, 2020, 37(3): 91-97 (in Chinese).
- [21] 卓梦婷, 胡松, 朱国平. 1989—2018年南极布兰斯菲尔德海峡海冰时空变化分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(6): 1113-1122.
Zhuo M T, Hu S, Zhu G P. Spatial-temporal variation of sea ice in the Bransfield Strait, Antarctic from 1989 to 2018[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(6): 1113-1122 (in Chinese).
- [22] 马丽娟, 陆龙骅, 卞林根. 南极海冰的时空变化特征[J]. *极地研究*, 2004, 16(1): 29-37.
Ma L J, Lu L H, Bian L G. Spatio-temporal character of Antarctic sea ice variation[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2004, 16(1): 29-37 (in Chinese).
- [23] 卞林根, 林学椿. 近30年南极海冰的变化特征[J]. *极地研究*, 2005, 17(4): 233-244.
Bian L G, Lin X C. Variation of Antarctic sea ice in the latest 30 years[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2005, 17(4): 233-244 (in Chinese).
- [24] 许淙, 万军, 吕非. 2002—2003年南极中山站地区风要

- 素变化特征[J]. *海洋预报*, 2004, 21(4): 28-34.
- Xu C, Wang J, Lu F. Analysis of wind in Chinese Antarctic Zhongshan station[J]. *Marine Forecasts*, 2004, 21(4): 28-34 (in Chinese).
- [25] 陈锦年, 褚健婷, 许兰英. ENSO循环过程与南极海冰变化[J]. *水科学进展*, 2004, 15(1): 56-60.
- Chen J N, Chu J T, Xu L Y. ENSO events associated with the variation of the Antarctic sea ice extent[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(1): 56-60 (in Chinese).
- [26] 陈洵子, 朱国平. 基于物种分布集成模型的布兰斯菲尔德海峡南极磷虾栖息地研究 [J]. *水产学报*, 2022, 46(3):390-401 .
- CHEN X Z, Zhu G P. Habitat of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the Bransfield Strait based on ensemble species distribution ensemble model[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(3): 390-401 (in Chinese).
- [27] King J C, Turner J. 南极天气和气候 [M]. 张占海, 译. 北京: 海洋出版社, 2007: 215-217.
- King J C, Turner J. Antarctic meteorology and climatology[M]. Zhang Z H, trans. Beijing: China Ocean Press, 2007: 215-217 (in Chinese).
- [28] 韦想云, 朱国平. 基于文献计量分析的南极海洋保护区研究动态[J]. *极地研究*, 2021, 33(1): 88-98.
- Wei X Y, Zhu G P. Bibliometric analysis of Antarctic marine protected area research[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2021, 33(1): 88-98 (in Chinese).
- [29] 韦想云, 朱国平. 论非政府组织在南极海洋保护区推进及磷虾渔业中的角色与作用 [J]. *水产学报*, 2022, 46(3):513-523 .
- WEI X Y, ZHU G P. On the role and function of non-governmental organizations in the promotion of Antarctic marine protected area and krill fishery[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(3): 513-523(in Chinese).
- [30] 贾明秀, 刘长东. 基于捕捞数据的南极半岛北部南极磷虾渔获量与驱动因子关系研究[J]. *中国渔业经济*, 2020, 38(2): 102-108.
- Jia M X, Liu C D. Study on the relationships between the catches of Antarctic krill (*Euphausia superba*) and driving factors based on the commercial fishing data[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2020, 38(2): 102-108 (in Chinese).
- [31] 陈吕凤, 朱国平. 基于地理加权模型的南设得兰群岛北部南极磷虾渔场空间分布影响分析[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(3): 938-944.
- Chen L F, Zhu G P. Analysis of influence on spatial distribution of fishing ground for Antarctic krill fishery in the northern South Shetland Islands based on GWR model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(3): 938-944 (in Chinese).

Impact of sea ice and wind field on the suitability of conventional krill fishing operation in the Bransfield Strait, Antarctica

ZHU Yuhang¹, ZHUO Mengting^{1,2,3}, ZHU Guoping^{1,4,5,6}, DONG Sisong^{1,4}, SHEN Xinyi¹,
ZHANG Chunling^{1,7}, CHENG Lingqiao^{1,4,7}, HU Song^{1,4,7*}

(1. College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology,
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Center for Polar Research, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

5. Polar Marine Ecosystem Laboratory, Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources,
Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

6. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

7. Experimental Teaching Demonstration Center for Marine Science and Technology,
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Global warming has attracted more and more attention. As the key factors of climate change, Antarctic sea ice and wind field significantly affect the safety and economic efficiency of fishing vessels. Krill fishery is an important part of China's pelagic fishery. China generally uses traditional fishing vessels for krill fishing, which is more vulnerable to the external environment than continuous pumping fishing vessels. The changing environment has a more and more significant impact on Antarctica. However, there has been no regional study on sea ice and wind field in Bransfield Strait. According to the adaptability of krill fishing, based on the sea ice concentration data of the National Snow and Ice Data Center of the United States and the wind field data of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) from 1989 to 2020, this study obtained the distribution and variation trend of sea ice concentration and wind in the Bransfield Strait, Antarctica within the Subarea 48.1 of the Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR) under climate change. The results show that under the background of global warming, the sea ice and wind speed in Bransfield Strait in Subarea 48.1 showed a decreasing trend, compared with CCAMLR Subarea 48.2, 48.3, and 48.4, Subarea 48.1 was more suitable for krill fishing. According to the distribution of fishing vessels' operating positions, the fishing operation area was mainly concentrated in central basin (CB) area and eastern basin (EB), and the sea ice concentration was 0.15-0.2 and in areas with large wind force (wind force level reached level 6 and above) for 50-70 days. For the characteristics of sea ice and wind field from 1989 to 2020, the suitable operation days under the influence of sea ice in Bransfield Strait (the days with sea ice density <0.2) increased; the wind direction in this area was mainly to the west, and the number of days with large wind force was less, and the trend was mainly increasing. Due to the low Beaufort scale in the study area, the suitable operation days of traditional fishing boats in the study area were greatly affected by sea ice. Therefore, combined with the changes of sea ice and wind in the Strait in the past 32 years and their impact on traditional fishing operation, our study showed that the suitable operation days of traditional fishing vessels will increase in the future, but the variation in krill resources derived from the change of sea ice and wind needs to be considered in the future study.

Key words: *Euphausia superba*; sea ice; wind field; trawl fishery; fishing ground; Bransfield Strait

Corresponding author: HU Song. E-mail: shu@shou.edu.cn

Funding projects: National Key R & D Program of China (2018YFC1406801); National Natural Science Foundation of China (41776185); International Key Project of Chinese Academy of Sciences (183611KYSB20200059)