

南极海冰运动速度的变化特征及其影响因子分析

张艺博^{1,2}, 秦昕², 魏立新²

(1. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘要: 利用 NSIDC 提供的每日和月平均极区海冰运动矢量数据, 统计分析了南极地区 1979—2016 年海冰运动速度的年、月尺度的时空变化特征以及近几十年南极海冰范围增加与海冰运动速度之间的关系, 并讨论了影响南极海冰运动速度的主要因子。结果表明: 1979—2016 年南大洋全区和各扇区海冰运动速度均呈现增加趋势, 春、冬季海冰运动速度增加趋势大于夏、秋季, 季节差异明显; 海冰运动速度与海冰范围有显著的正相关关系; 海冰运动与海表面气压场密切相关, 主要受低压风场的影响, 威德尔海、罗斯海海冰的快速流出和顺时针旋转的特征与低压区的位置有密切关联, 自由漂流区的海冰整体表现为自西向东运动。

关键词: 南极海冰; 海冰运动速度; 海冰范围; 海表面气压; 海表面风场

中图分类号: P731.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)05-0012-12

1 引言

海冰主要分布在地球的南北两极, 是全球气候变化最敏感的成分之一。海冰通过反射、热辐射等方式影响海气热交换。海冰的高反照率大大减少了极地对太阳辐射的吸收, 使极地成为全球气候系统的热汇和冷空气的源地; 海冰的存在阻断了海洋与大气的之间热量、动量、水汽及二氧化碳等的交换; 海水冻结和融化过程提供了海冰与海洋之间的直接联系, 影响海洋的垂直和水平温盐环流, 进而对全球气候变化产生影响^[1-4]。伴随全球气候变暖, 北极地区的海冰范围和面积快速减少^[5], 厚度也显著地变薄^[6-7]。研究表明, 北极的这种变化与大气、海洋的变化密切相关, 相互作用过程非常复杂^[8-10]。而南极地区海冰观测则发现, 南极海冰呈现出缓慢增长的趋势, 年增长率约为 1.3%^[11-12]。在全球变暖背景下, 科学家对南极海冰异常增加的现象开展了一些研究^[13-16], 但是至今没有令人信服的完整理论; 与国内外对北极海冰的研究热潮相比, 南极海冰的研究相对较少。

围绕上述南极地区海冰增加这一引人注目的特征, 科学家已开展了大量研究。马志飞^[11]认为南极海冰增加是由于冰川不可逆融化漂移导致的; 樊婷婷^[14]指出绕极西风对南极海冰有重要作用, 绕极西风增强使南大洋变冷, 最终导致了南极海冰增加; 美国国家航空航天局在 2016 年的研究则表明, 南极洲的地形与周围海域的水深是海冰变化的主要影响因素。Parkinson 等^[3,15-16]在一系列文章中将整个南大洋分为 5 个扇区(见图 1)。文章指出大气环流的变化对南极地区海冰范围增长有重要作用, 并认为海冰变化是由热力作用和动力作用共同引起。根据 Polyakov 等^[17]的研究, 大气的热力学强迫在海冰变化中起了更重要的作用。陈静等^[12]研究了南大洋 5 个扇区海冰覆盖率与多元厄尔尼诺指数 (Multivariate ENSO Index, MEI) 等的关系, 认为南大洋 5 个扇区海冰覆盖率对气候因子响应不同, 其中 MEI 对印度洋和罗斯海海域影响较显著。马丽娟等^[18]对 1968—2002 年共 35 a 的南极海冰时空变化进行研究, 发现南大洋海冰北界向南收缩, 不同区域的海冰北界都存在着较明显的 2~4 a 和 5~7 a

收稿日期: 2019-09-18; 修回日期: 2020-03-06。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1402703)。

作者简介: 张艺博(1995-), 女, 硕士, 主要从事海-冰-气相互作用研究。E-mail: sytion_ouc@126.com

主振荡周期。卞林根等^[19]利用聚类分析方法分区讨论了南大洋海冰范围对极涡的响应,在各个分区二者的响应关系都十分明显,但表现出的敏感度不同。

在海冰运动速度变化方面,左正道等^[20]量化研究了海冰运动速度和范围之间存在的联系,同时针对二者之间的长期变化趋势进行了相关性分析,定量讨论了海冰运动速度对北极不断减少的海冰范围的影响。他认为风本身会直接作用于海冰^[21-23],给予海冰拖曳力的作用,使得海冰在力的作用下进行运动。另外,海冰运动的变化也会引起海冰的辐散辐合,海冰减少区域会出现薄冰。Comiso等^[24]也发现薄冰对风的响应更加敏感。随着风速增加,薄冰运动速度会有更明显的增加,并会在风强迫作用下发生破碎等现象。Lei等^[25]研究了2014年和2016年北极海冰运动对气旋活动的响应情况,发现2016年海冰运动速度增加得益于气旋活动加强、海冰密度降低。周舒等^[26]研究发现北极太平洋扇区海冰面积与气旋活动之间存在负相关关系,认为气旋活动时的大风会驱使海冰运动,形成开阔水面从而引起海冰融化的加剧。田忠翔^[27]对弗雷姆海峡海冰开展研究,发现该处海冰运动方向有x分量增加的趋势,并与风速x分量增加呈显著正相关。综合上述文献可以看出,前人对极区海冰运动速度的研究多集中于北极海冰。

本文利用卫星观测数据计算获得的海冰运动矢量数据分析了南极海冰运动速度的时空分布特征及其与南极海冰范围、海表面气压场和风速等因

子之间的关系。

2 研究数据及研究方法

南极海冰运动速度数据来自于美国冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)提供的第三版1979—2016年每日和月平均极区海冰运动矢量数据(网址: <https://nsidc.org/data/NSIDC-0116/versions/3>)。该数据由AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)、SMR(Scanning Multichannel Microwave Radiometer)和SSM/I(Special Sensor Microwave Imagers)传感器获得,分辨率为 $25\text{ km} \times 25\text{ km}$,南极部分由 321×321 个网格点组成。NSIDC通过卫星图像计算冰的运动,根据图像的像素分辨率和图像之间的时间跨度计算冰的速度矢量,海冰运动矢量数据最终以二进制的形式储存。海冰范围数据采用NSIDC发布的南极海冰范围数据集。海表面风速度和海表面气压数据来自于美国气候中心发布的美国气象环境预报中心/美国国家大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR)再分析数据集(网址: <https://www.esrl.noaa.gov>),网格分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。本文根据 $s = \sqrt{(u^2) + (v^2)}$ 计算海冰运动速度大小和海表面风速大小^[20,28],采用标量化方式,即不考虑运动方向,只考虑速率大小,累加之后再平均即为月平均海冰运动速度大小和月平均海表面风速大小。

在研究海域利用再分析数据计算1979—2016年海冰运动速度、海冰范围和海表面风速等的月平均、季节平均和年平均时间序列。在此基础上利用最小二乘法对时间序列进行趋势分析,以确定最佳拟合曲线。研究各元素在格点上的变化,展现在地图上表现为该元素的空间变化趋势。本文的时间序列图中 R^2 为决定系数,空间分布图中标记格点表示通过95%显著性检验。

3 南极海冰运动特征

按照南半球传统季节划分方法,将南极划分为春季(9—11月)、夏季(12—2月)、秋季(3—5月)和

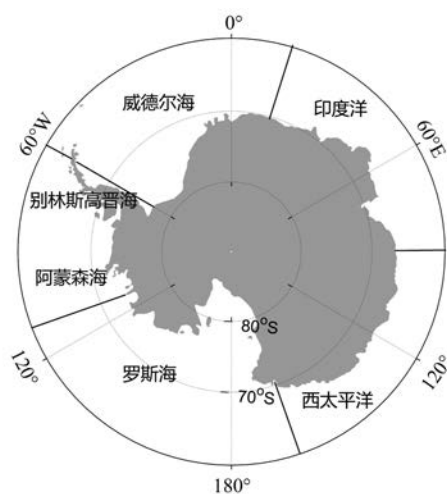


图1 南大洋5个扇区分布示意图(引自文献[16])

冬季(6—8月)。从海冰运动速度月平均时间序列可看出(见图2a):海冰在1月(盛夏)达到最低值;之后运动速度增加,其中2—4月海冰运动速度迅速增加;之后加速放缓;8月(隆冬)达到最大后开始下降,11—12月移速迅速下降。图2b展示了南极海冰年平均速度时间序列,由图可见其运动速度有明

显的年际变化,并且有线性增加趋势,通过了95%的显著性检验。结合季节变化曲线(见图3)进一步分析表明,南极4个季节海冰运动速度都有增加的趋势,其中春、秋、冬3个季节均通过95%的显著性检验。海冰运动速度在春、夏、秋、冬的年平均增长量分别为2.82 m/h、0.34 m/h、2.07 m/h和3.26 m/h。

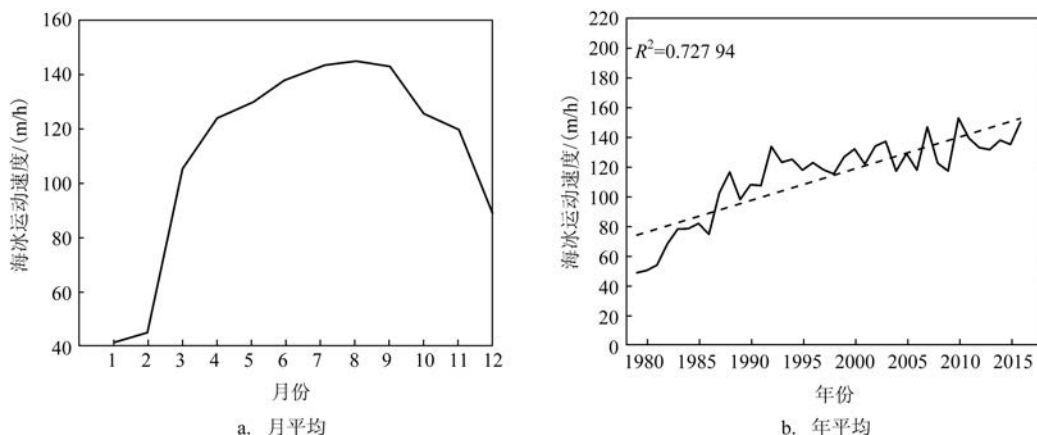


图2 1979—2016年南极平均海冰运动速度

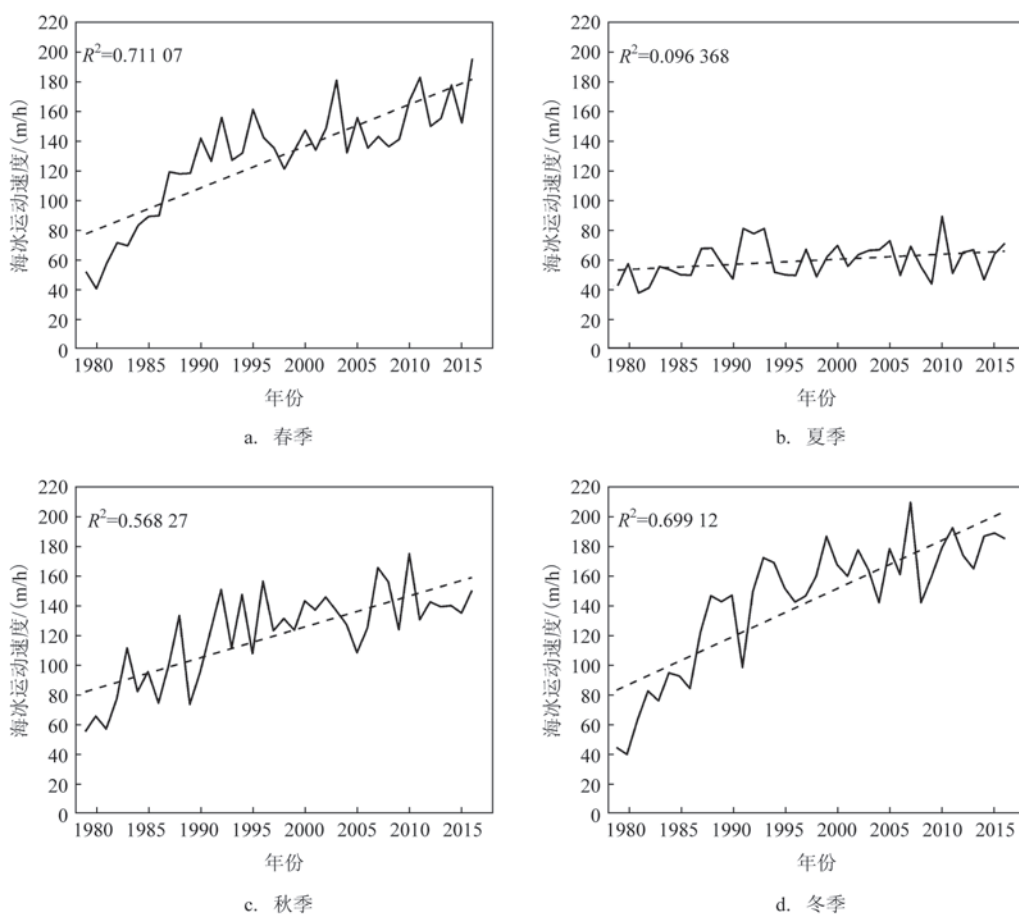


图3 1979—2016年不同季节海冰运动速度年平均时间序列

可见春、秋、冬季海冰运动速度的增加对南极海冰运动速度的增加趋势贡献率比较大,其中冬季贡献最大,而夏季贡献率较小,这主要是由于夏季海冰

运动速度较低所致。

图4为南大洋1—12月月平均海冰运动速度空间分布图。整体而言,高纬度向低纬度海冰运动速

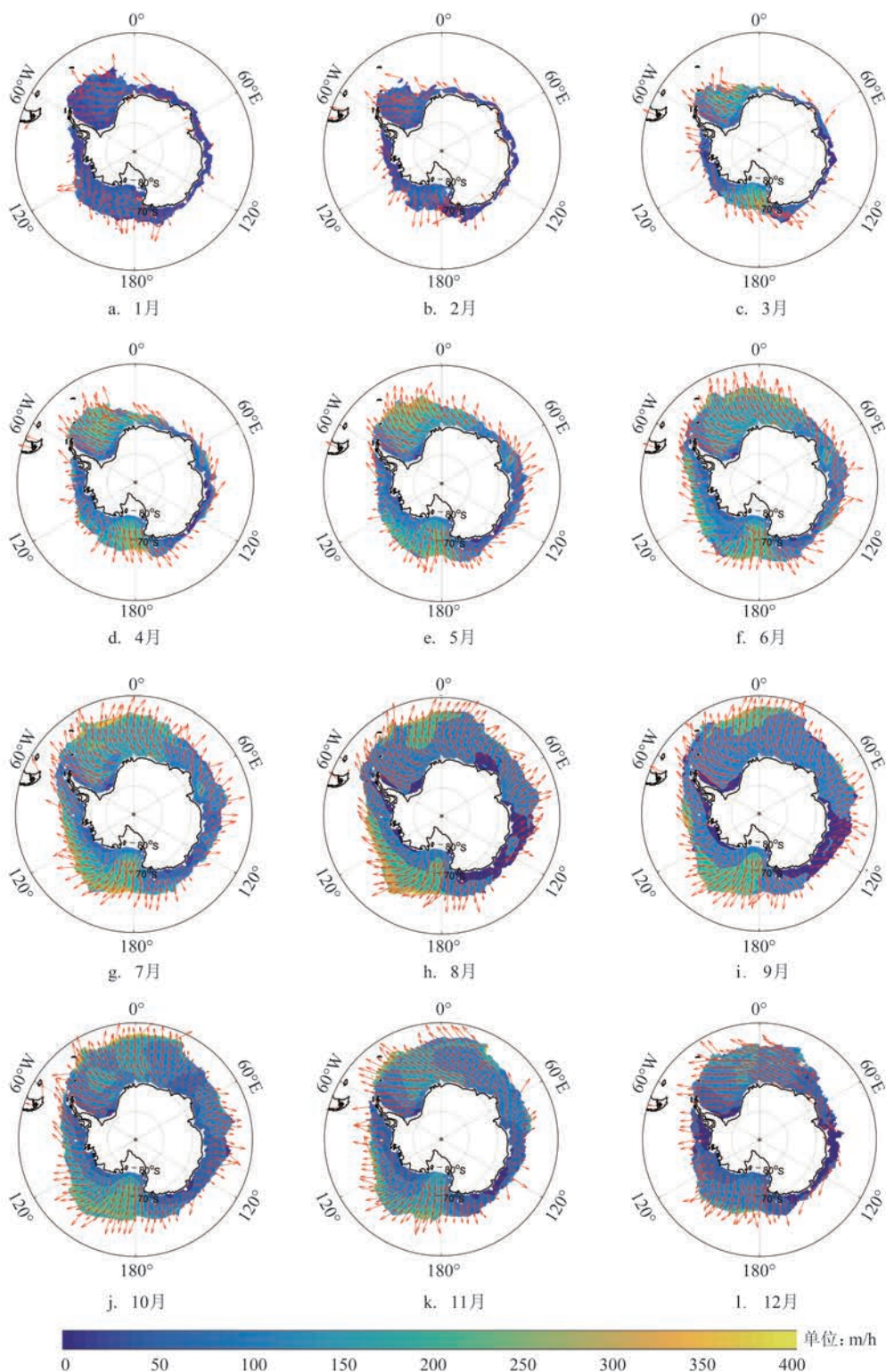


图4 南大洋月平均海冰运动速度分布(箭头表示方向,颜色表示大小)

度大小呈现递增趋势,远离海岸线,冰接近自由漂移的状态,沿等压线以地转风偏左很小的角度运动。从南北方向来看,整个南大洋海冰都有自南向北的运动分量,其中冬季海冰的北向运动特征更加明显;东西方向上,转换季节的海冰自东向西的运动特征相对更加明显。威德尔海主要表现为自东向西运动并伴有顺时针旋转,主要由于该扇区盛行东风漂流^[29];罗斯海扇区海冰变化较为剧烈,以北向流出为主,该处海冰运动速度也较快。

表1为南大洋5个扇区海冰运动速度的统计量。结合图4可知,1979—2016年南大洋5个扇区春、秋、冬3个季节的海冰运动速度均呈现增加趋势,并通过95%显著性检验;夏季增加趋势未能通过显著性检验。从季节变化来看,冬、春季海冰运动速度最快,海冰运动速度年增加率也最大;夏、秋季,特别是夏季,海冰运动速度较慢,运动速度年增加率也最慢。南极海冰运动速度区域差异明显,罗斯海扇区海冰运动速度年增加量最大(约为3.1 m/h),其中冬季海冰移速年均线性增长达到3.8 m/(h·a),夏季也可以达到0.8 m/(h·a)的线性增长量。太平洋扇区海冰运动速度线性增加较小,年平均增加量为1.33 m/h,夏季仅为0.03 m/h。威德尔海海冰运动速

度较快,但线性增加较小。这主要是由于威德尔海靠近南极半岛部分海冰运动速度有减少趋势(见图5),虽未能通过显著性检验,但对海冰运动速度的变化趋势也有一定的影响。

图5为1—12月南极海冰月平均运动速度变化率空间分布。图中可以看到各月都是增加趋势占主导,这一特征在冬季表现的更为明显。春、秋、冬3个季节大部分正值区域可以通过95%的显著性检验(灰色区域)。负值区主要出现在威德尔海南极半岛沿岸地区,但均未通过显著性检验。印度洋扇区和太平洋扇区海冰运动速度在春、秋、冬3个季节都有增加趋势,且可以通过显著性检验;罗斯海海冰运动速度在春、秋、冬3个季节有明显增加的趋势,除迪蒙迪维尔海外均可以通过95%显著性检验;别林斯高晋海仅在冬季海冰运动速度增加趋势较为显著。

4 南极海冰运动速度对海冰范围的影响

图6a展示了南极海冰范围月平均时间序列。从图中可见,海冰范围在2月(夏季)最低,平均为1.17×

表1 南大洋5个扇区海冰运动速度统计量

统计量	季节	印度洋扇区	威德尔海扇区	太平洋扇区	罗斯海扇区	别林斯高晋海-阿蒙森海扇区
平均海冰运动速度/ (m/h)	春	116.1	114.2	71.7	165.4	110.6
	夏	51.1	72.8	36.0	68.4	45.7
	秋	90.5	154.7	63.7	159.5	92.4
	冬	128.5	164.5	86.5	175.6	130.9
	全年	96.5	134.8	64.5	142.3	94.9
海冰运动速度年平 均线性增长量/ (m/(h·a))	春	3.3	2.2	1.8	3.8	2.3
	夏	0.2	0.4	0.03	0.8	0.5
	秋	2.5	1.1	0.9	4.0	1.7
	冬	4.4	2.4	3.8	3.8	3.1
	全年	2.6	1.5	1.33	3.1	1.9
最大运动速度/ (m/h)	春	249.1	239.4	114.0	270.9	177.4
	夏	86.8	117.1	61.9	148.8	79.0
	秋	186.7	222.6	98.0	303.9	158.3
	冬	291.0	255.3	114.3	288.6	227.2
最小运动速度/ (m/h)	春	38.3	36.9	14.7	54.9	34.1
	夏	28.4	40.9	15.4	21.1	18.3
	秋	18.5	91.9	18.1	27.8	32.0
	冬	19.5	43.6	21.1	60.4	39.3

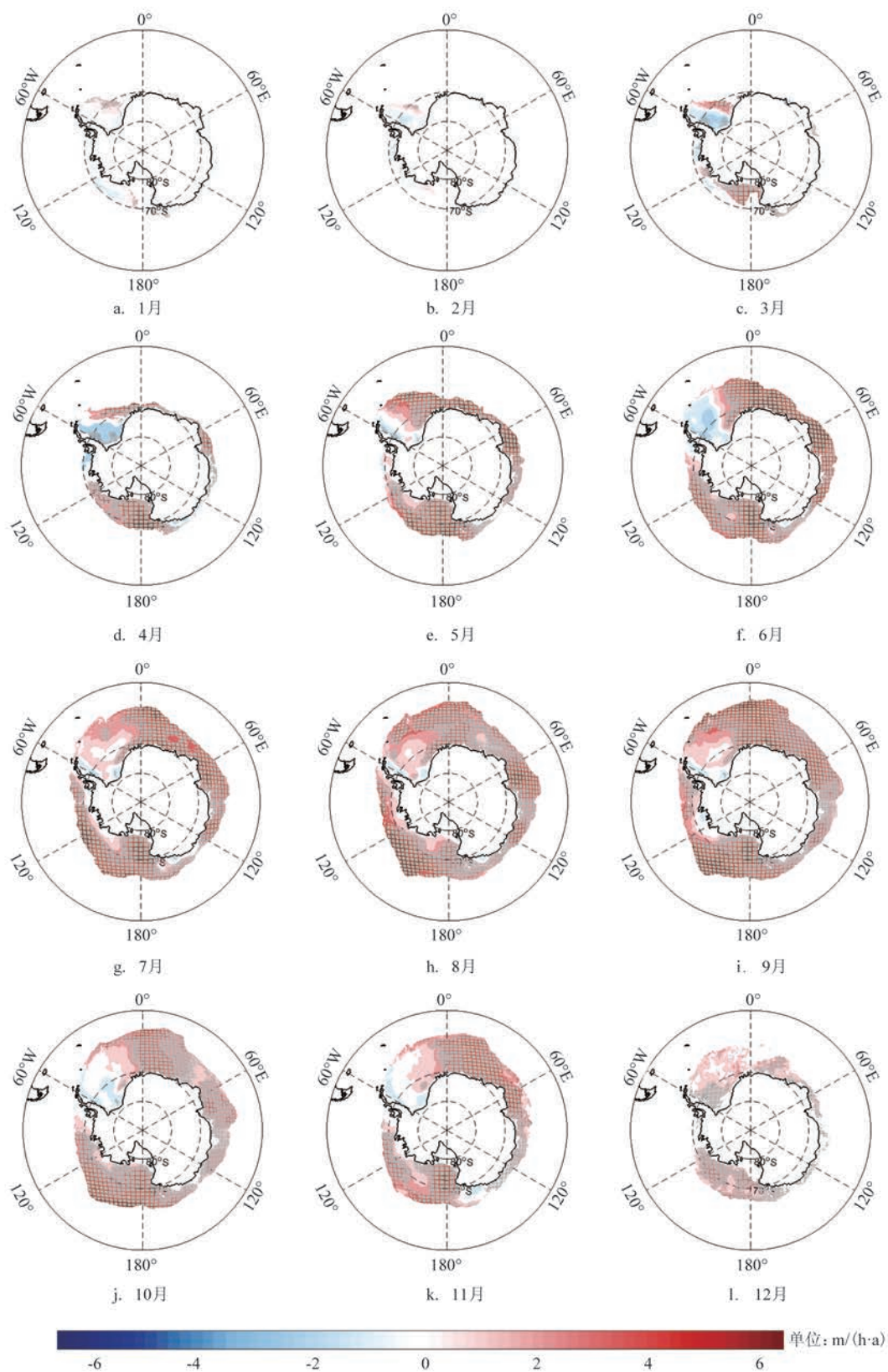


图5 月平均南极海冰运动速度变化 (灰色区域代表达到95%显著性水平)

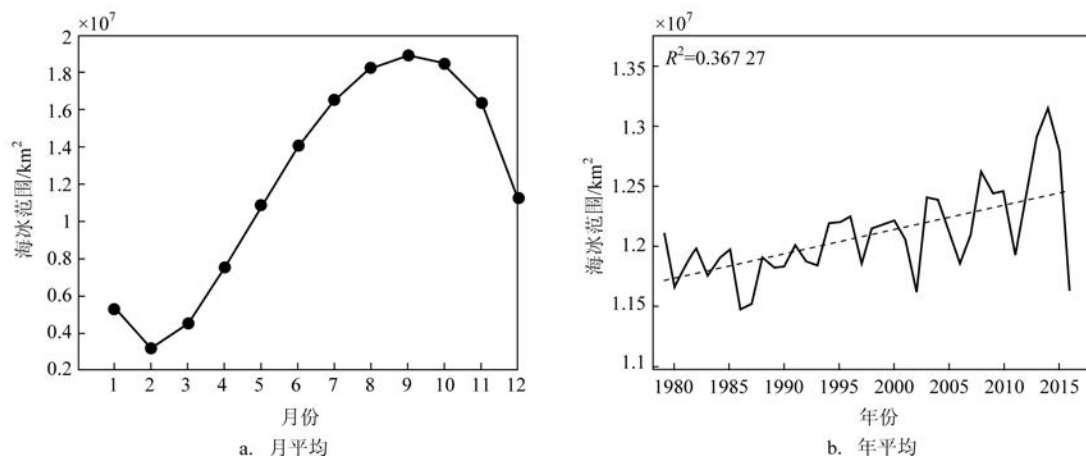


图6 1979—2016年南极海冰范围平均时间序列

10^4 km^2 , 9月(冬季)最大, 平均为 $1.174 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。冬季和夏季海冰范围相差大, 存在明显的季节变化。图6b给出了南极海冰范围年平均时间序列, 结合图2b可以看出, 1979—2016年间海冰运动速度和海冰范围均线性增长, 且都通过了95%的显著性检验。海冰范围年平均增加量超过 $1.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 在2014年达到最大值 $1.13 \times 10^5 \text{ km}^2$ 后开始降低。

对1979—2016年共456 M的逐月海冰范围与海冰运动速度去除线性趋势后做相关性分析, 发现二者存在显著正相关关系, 相关系数达到0.54, 超过95%的显著性水平。对比二者月平均变化可以看出, 海冰运动速度在二者关系中起主导作用。海冰运动速度先发生变化, 随之海冰范围发生变化, 并且这种响应存在滞后性和持续性。数据表明, 海冰运动速度增加是引起南极海冰范围增加的原因之一。

对二者做超前滞后相关性分析可以看出(见图7), 海冰范围在滞后海冰运动速度1 M的时候, 二者相关性最强, 达到0.63, 为显著的正相关关系。在同期直到海冰运动速度超前海冰范围3 M的时间内, 二者都有非常好的相关性关系, 均可以通过95%的置信度检验。这说明海冰运动速度与海冰范围存在着显著的正相关关系, 海冰运动速度的大小可以持续影响海冰范围的变化, 这一显著影响在海冰范围滞后海冰运动速度1 M时达到最强, 且这种影响可以持续到3 M之后。

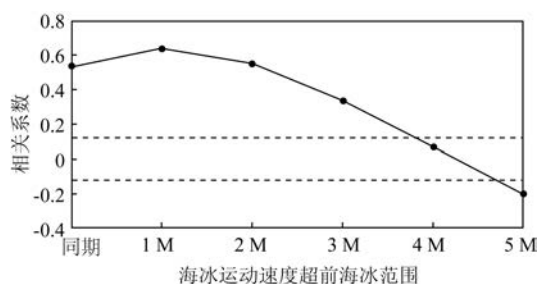


图7 海冰运动速度与海冰范围的超前滞后相关
(虚线为95%显著性检验区间)

5 影响南极海冰运动速度的部分因子分析

5.1 海表面风速

图8为1979—2016年冰区海表面风速年平均时间序列。年平均海表面风速呈增加趋势, 年平均增加 0.02 m/s , 通过95%的显著性检验。海表面风可以直接作用于海冰并影响海冰的运动, 因此对1979年1月—2016年12月共456 M的海表面风速和海冰运动速度进行分析(见图9), 可以发现二者有非常好的相关性。海表面风速较高的月份, 海冰运动速度也较快, 二者相关性可以达到0.65, 为显著的正相关关系。

从图10中可以看出5大扇区海表面风速都有增加的趋势, 且都与海冰运动速度呈显著正相关关系, 可以通过95%的显著性检验。威德尔海扇区海

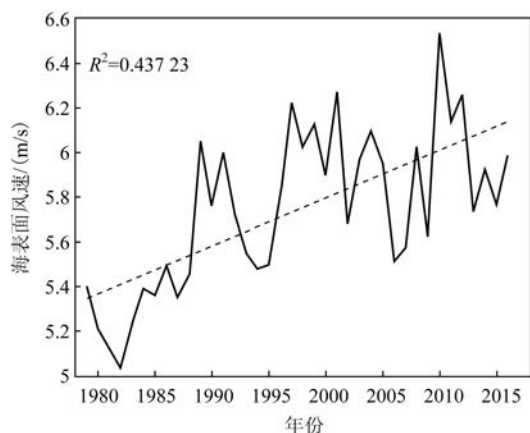


图8 1979—2016年南极冰区海表面风速年平均时间序列

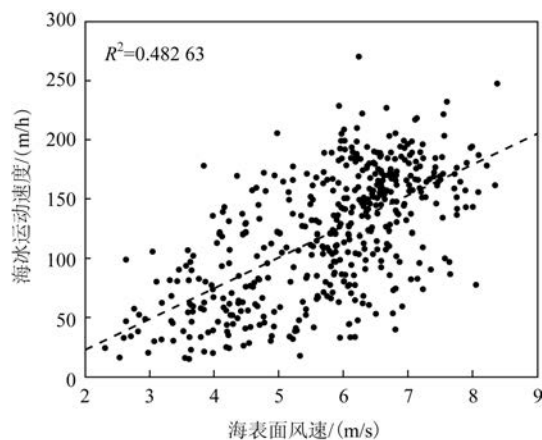


图9 1979年1月—2016年12月南极冰区月平均海表面风速与海冰月平均运动速度之间的关系

表面风速年均增加量为0.013 m/s,增量为5大扇区中最低;海冰运动速度与海表面风速年平均相关系数可以达到0.54,表现为显著的正相关,为5个扇区中二者相关系数最高。印度洋扇区海表面风速年均增加量为0.023 m/s,海冰运动速度与海表面风速年平均相关系数可以达到0.38,相关性在5大扇区中最低。太平洋扇区海表面风速年均增加量为0.023 m/s,海冰运动速度与海表面风速年平均相关系数可以达到0.42,表现为显著的正相关。罗斯海扇区海表面风速年均增加量为0.029 m/s,增量在5大扇区中最高;海冰运动速度与海表面风速年平均相关系数可以达到0.43,表现为显著的正相关。别林斯高晋-阿蒙森海扇区海表面风速年均增加量为0.021 m/s,海冰运动速度与海表面风速年平均相关系数可以达到0.44,表现为显著的正相关。综上所述,5大扇区海冰运动速度都受到海表面风速的影响,不同海域相关性不同。

图9所展示的线性拟合曲线可以发现海冰运动速度与海表面风速整体上变化趋势较为一致,海表面风速较大时一般对应海冰运动速度也较大。在海表面风速超前海冰运动速度1 M时(见图11),二者相关性最高可以达到0.67,表现为显著的正相关,可以通过95%的相关性检验。在之后的2 M,二者超前滞后相关系数均可通过95%的显著性检验。这说明海表面风速与海冰运动速度之间存在着显著的正相关关系,海表面风速大小可以持续影响海冰运动速度的变化。这一显著影响在海冰

运动速度滞后海表面风速1 M时达到最强,并且在海表面风速作用之后的3 M内持续影响海冰运动速度。

5.2 海表面气压

海表面风速主要受天气系统影响,因此这里给出海表面气压与海冰运动速度之间的关系。由于夏季南极海冰大量融化,海冰运动速度很小,计算误差相对较大,因此这里只研究春、秋、冬3个季节的情况。图12是海冰运动速度与海平面气压场的叠加图,底图为海平面气压场,箭头表示海冰运动速度。图中可以看到,南大洋区域大气的典型特征是由于大量气旋活动形成的常年存在的绕极低压槽。3个低压中心分别位于印度洋、太平洋和阿蒙森海-罗斯海,这里常年活跃着低压系统,对海冰运动有着重要影响。短时间尺度上,伴随低压系统的梯度风是海冰运动的重要驱动力;长时间尺度上,梯度风决定了海冰的区域运动特征。例如,在威德尔海到印度洋扇区存在的低压区西侧,海冰为环绕低压顺时针向北运动,秋季该海域的气旋活跃,低压区强度加强,威德尔海外围的运动速度也加快;在罗斯海区域,受低压区西侧南向风的影响,该区域的海冰向北流出速度快,并且风向也有围绕低压区顺时针旋转的趋势。进入自由漂流区后受低压北部偏西风的作用,海冰运动的偏西分量逐渐加大,并受到地转偏向力的作用,以西北向运动为主。

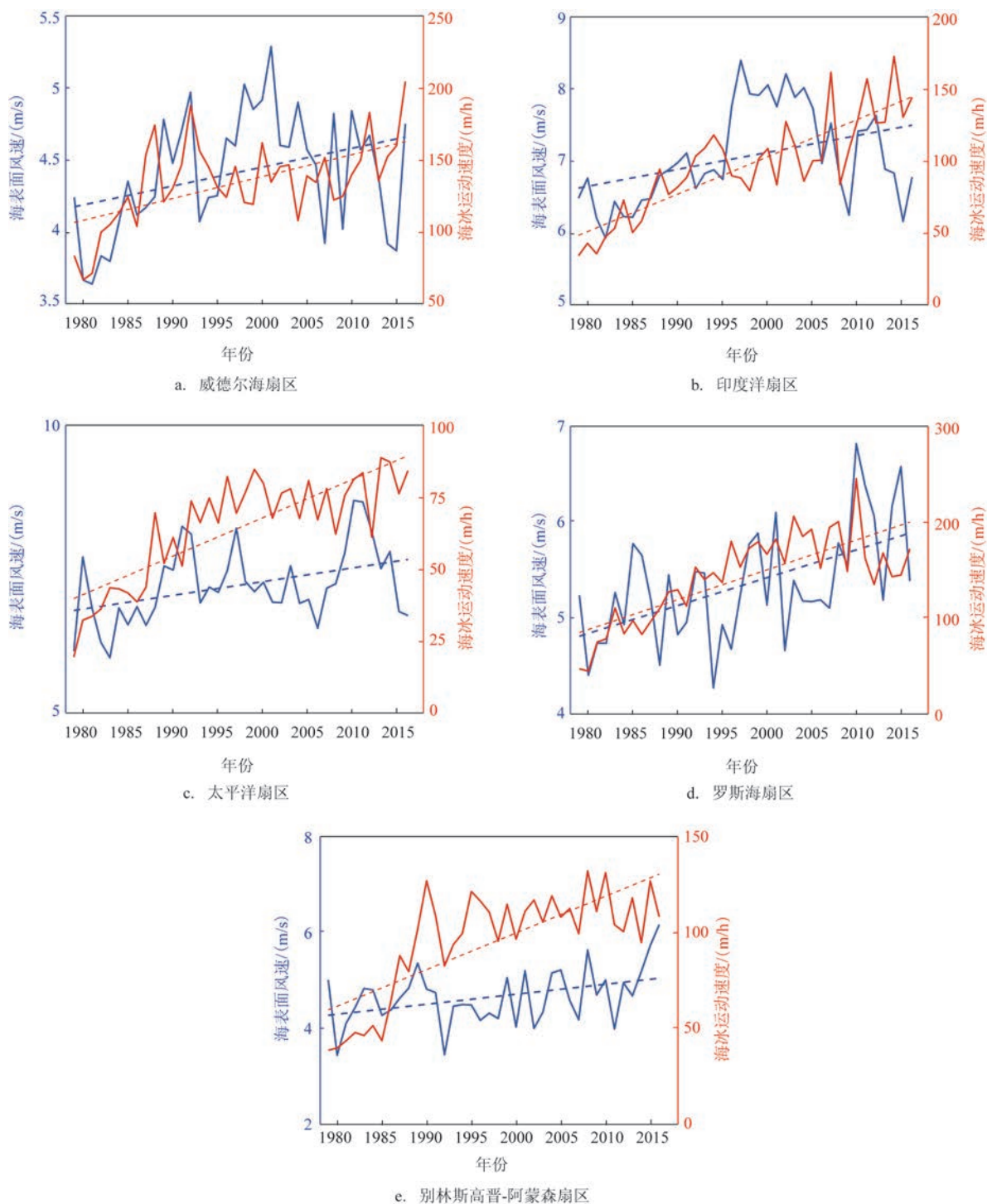


图10 1979—2016年5大扇区海表面风速年平均时间序列

6 结论与讨论

(1) 无论是南极整体还是5大扇区, 冬季海冰平

均运动速度最快, 夏季最慢, 季节差异明显。南大洋年平均海冰运动速度呈上升趋势, 并通过95%的显著性检验。春、秋、冬3个季节的海冰运动速度时间序列也通过95%的显著性检验, 其中冬季运动速

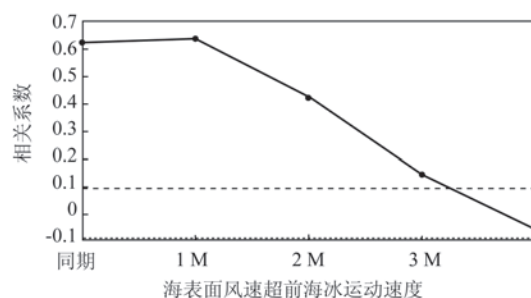


图 11 风速与海冰运动速度的超前滞后相关(虚线为95%显著性检验区间)

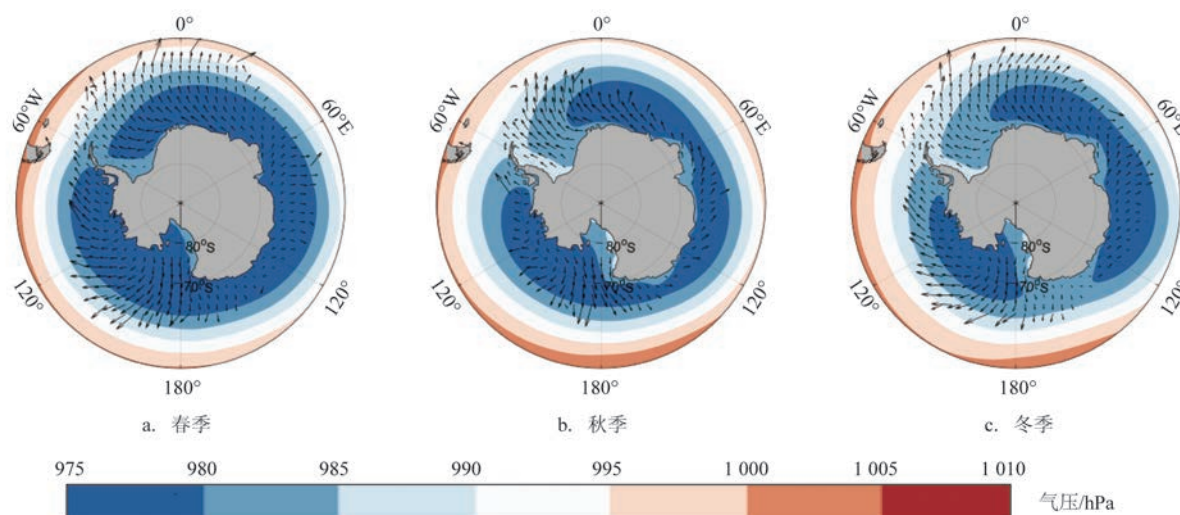


图 12 海冰运动速度与海平面气压场的叠加图(底图为海平面气压场,箭头表示海冰运动速度)

度变率最大。南大洋5大扇区中罗斯海扇区海冰运动速度年增加量最大,约为3.1 m/h;威德尔海海冰运动速度较快,但海冰运动速度线性增加较小,仅有1.5 m/h,主要由于威德尔海靠近南极半岛部分海冰运动速度有减少趋势。

(2)南极海冰运动速度与南极海冰范围之间存在显著的正相关关系。海冰运动速度超前海冰范围1 M时相关性最好,达到0.63,为显著的正相关关系。海冰运动速度对海冰范围的影响可以从同期一直持续到3 M后。随着海冰运动速度的加快,海冰范围不断增加,这种紧密联系表明两者有相同的影响因子,因此海冰运动速度的显著加快可能是近几十年南极海冰范围增加的影响因素之一。

(3)文章分析了海表面风速和海平面气压场与海冰运动速度的关系。结果表明:自由漂移区海冰受海表面气压场的影响绕低压顺时针运动,低压槽

西侧海冰运动速度最大,导致该处海冰流出最剧烈,这是威德尔海和罗斯海海冰流出速度大的主要原因之一。低压对海冰运动的影响主要通过海表面风对海冰的拖曳作用,两者相关系数达到0.67,表现为显著的正相关关系,并且二者变化趋势较为一致,都是显著增加。

影响南极海冰运动特征的因子繁多,影响机制也十分复杂。本文仅就海表面风速、海平面气压场、海冰范围与海冰运动速度可能存在的关系进行了讨论,未来仍需对其他影响因子及其影响机制对海冰的作用过程做进一步分析研究。

参考文献:

- [1] Barry R G, Serreze M C, Maslanik J A, et al. The Arctic Sea Ice-Climate System: Observations and modeling[J]. Reviews of Geophysics, 1993, 31(4): 397-422.
- [2] Mahoney A R, Barry R G, Smolyanitsky V, et al. Observed sea ice

- extent in the Russian Arctic, 1933-2006[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C11): C11005.
- [3] Parkinson C L, Cavalieri D J. Antarctic sea ice variability and trends, 1979-2010[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(4): 871-880.
- [4] Pezza A B, Rashid H A, Simmonds I. Climate links and recent extremes in Antarctic sea ice, high-latitude cyclones, Southern Annular Mode and ENSO[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 38(1-2): 57-73.
- [5] 魏立新. 北极海冰变化及其气候效应研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [6] Rothrock D A, Yu Y, Maykut G A. Thinning of the Arctic sea-ice cover[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(23): 3469-3472.
- [7] Kwok R, Rothrock D A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958-2008[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(15): L15501.
- [8] 康建成, 唐述林, 刘雷保. 南极海冰与气候[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(7): 786-793.
- [9] 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.
- [10] 邵珠德. 南极春夏季海冰变化及其与气候要素的关系研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [11] 马志飞. 南极的冰: 究竟在增加还是在减少[J]. *生命与灾害*, 2016(11): 26-29.
- [12] 陈静, 陆志波. 1979-2013 年南大洋海冰变化特征及与典型气候变化因子的相关性分析[J]. *极地研究*, 2016, 28(4): 539-547.
- [13] Liu J P, Curry J A. Accelerated warming of the Southern Ocean and its impacts on the hydrological cycle and sea ice[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(34): 14987-14992.
- [14] 樊婷婷. 近 30 年来南极海冰增长的本质特征及其影响机制[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [15] Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(1): L01703.
- [16] Parkinson C L, Cavalieri D J. Arctic sea ice variability and trends, 1979-2006. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C7): C07003.
- [17] Polyakov I V, Walsh J E, Kwok R. Recent changes of Arctic multiyear sea ice coverage and the likely causes[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(2): 145-151.
- [18] 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.
- [19] 卞林根, 陆龙骅, 贾朋群. 南极海冰和极涡指数的时空特征及相互关系[J]. *地理学报*, 1996, 63(1): 33-43.
- [20] 左正道, 高郭平, 程灵巧, 等. 1979-2012 年北极海冰运动学特征初步分析[J]. *海洋学报*, 2016, 38(5): 57-69.
- [21] Overland J E. Atmospheric boundary layer structure and drag coefficients over sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1985, 90(C5): 9029-9049.
- [22] Hakkinen S, Proshutinsky A, Ashik I. Sea ice drift in the Arctic since the 1950s[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(19): L19704.
- [23] Spreen G, Kwok R, Menemenlis D. Trends in Arctic sea ice drift and role of wind forcing: 1992-2009[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(19): L19501.
- [24] Comiso J C, Kwok R, Martin S, et al. Variability and trends in sea ice extent and ice production in the Ross Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C4): C04021.
- [25] Lei R B, Gui D W, Heil P, et al. Comparisons of sea ice motion and deformation, and their responses to ice conditions and cyclonic activity in the western Arctic Ocean between two summers[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 170: 102925.
- [26] 周舒, 张录军, 周玮佳. 夏季外来气旋对北极太平洋扇区海冰的影响[J]. *科学通报*, 2019, 64(18): 1922-1929.
- [27] 田忠翔. 北极海冰运动变化特征分析[D]. 北京: 国家海洋环境预报研究中心, 2012.
- [28] 刘伊格, 柯长青, 张杰. 1979-2015 年罗斯海海冰运动速度变化[J]. *极地研究*, 2018, 30(2): 154-160.
- [29] 唐述林, 秦大河, 任贾文, 等. 夏季南极威德尔海至普利茨湾之间海冰的特性研究[J]. *地学前缘*, 2006, 13(3): 213-218.

Analysis of characteristics of sea ice motion in Antarctic and related factors

ZHANG Yi-bo^{1,2}, QIN Ting², WEI Li-xin²

(1. Ocean University of China, Qingdao 266100 China; 2. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China)

Abstract: Using the daily and monthly average polar sea ice motion data provided by NSIDC, we investigated the characteristics of Antarctic sea ice motion from 1979 to 2016. The relationship between sea ice motion and sea ice extent and the main factors affecting sea ice motion in Antarctica are also discussed. It shows that sea ice motion in the Southern Ocean has an increasing trend, and the trend is more pronounced in winter and summer with an obvious seasonal difference. The sea ice motion has positive relationship with sea ice extent. The sea ice movement is closely related to the sea surface pressure field and is mainly affected by the low-pressure wind field. The rapid outflow and clockwise rotation of the sea ice in the Weddell Sea and Ross Sea are closely related to the location of the low-pressure zone, and the overall movement of sea ice in the free drift zone is from west to east.

Key words: Antarctic sea ice; sea ice motion; sea ice extent; sea level pressure; sea surface wind