

1979 – 2014 年南极海冰运动特征分析^①

刘伊格^②* ** *** 柯长青^③* 张 杰**

(* 南京大学地理与海洋科学学院 南京 210023)

(** 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

(*** 中国南海研究协同创新中心 南京 210023)

摘 要 在南极海冰缓慢增加的背景下,用美国冰雪数据中心的月平均海冰运动数据,分析了 1979 – 2014 年南极海冰的运动特征。结合月平均风速资料,探讨了风速对南极海冰运动变化的影响。结果表明:1979 – 2014 年南极海冰运动速度总体上呈增加趋势,其中冬季平均运动速度最大,然后是秋季、春季,夏季最小。威德尔海和罗斯海作为南极海冰分布最多的 2 个子海区,海冰的平均运动速度均呈现加快趋势,冬季海冰平均运动速度增加趋势均比夏季强。南极海冰运动速度与风速在季节和年平均变化趋势上保持高度一致,存在较为显著的正相关关系,所以风速增大是导致南极海冰运动速度加快的一个重要原因。

关键词 南极,海冰运动,风速,遥感

0 引 言

南极在全球变暖中发挥着举足轻重的作用,因为这一区域发生的大气-冰-海洋的相互作用通过反馈、生物地球化学循环、深层大洋环流、能量的大气辐射传输以及冰物质平衡的变化等而影响整个地球系统^[1]。海冰具有较高的反射率,对海洋和大气之间热量与水汽交换具有抑制作用^[2,3]。南极地区热量收支与海冰生成消融伴随的潜热变化密不可分,海冰变化不仅会影响南极局部地区能量平衡,对于海洋、大气等在内的全球气候系统的稳定和变化也会产生很大影响。

遥感技术具有大面积同步观测、时效性强、能长时间快速动态监测等优点,现已成为海冰变化研究中不可或缺的前沿技术和手段。近年来,国内外许多学者通过遥感手段研究南极海冰变化。Comiso 和 Bjorgo 等^[4,5]发现 1979 – 1996 年南极海冰范围以

及海冰面积分别增加了 $1.43 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $1.38 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。Cavalieri 和 Liu 等^[6,7]结合 1979 – 2006 年的微波遥感数据发现南极海冰范围以及海冰面积每 10 年分别增加了 $0.9 \pm 0.2\%$ 、 $1.7 \pm 0.3\%$ 。卞林根等^[8]指出 1977 – 2002 年南极海冰面积指数呈增加趋势,其倾向率因季节不同而有所差异。王红霞^[9]基于多源微波遥感对南极海冰的厚度以及海冰密集度进行了探讨。对南极海冰变化的研究,可以更深入地了解南极海冰变化特征,探究其与全球大气和海洋之间变化的关联。但是目前众多南极海冰的研究主要集中在海冰范围、面积、密集度以及厚度等^[4-12]方面,对南极海冰运动速度变化的研究较少。南极海冰变化主要受到热力和动力两个作用机制影响^[13,14],热力作用通过气温直接影响海冰的冻结和融化而影响海冰分布范围;动力作用则通过影响海冰运动、破碎等,进而影响海冰分布^[15,16]。海冰的运动使得南大洋各个海区之间发生海冰的交换,也促进了南大洋

① 国家自然科学基金(41371391),国家重点研发计划(2016YFA060012)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2014G31)资助项目。

② 女,1994 年生,硕士生;研究方向:遥感及其应用;E-mail:liuyg1225@163.com

③ 通讯作者,E-mail:kecq@nju.edu.cn
(收稿日期:2018-05-02)

与较低纬度海洋之间的海冰交换,显著改变南极海冰的分布状况^[14]。因此探讨海冰动力作用在南极海冰分布变化中的作用很有必要。

本文主要围绕南极海冰的运动特征展开研究,基于遥感卫星资料分析了 1979 – 2014 年整个南极、威德尔海子海区以及罗斯海子海区海冰运动特征以及海冰在不同海区之间的输送输运过程,最后结合风场资料探讨其对海冰运动的影响。

1 数据与方法

美国冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)是由美国宇航局、美国海洋和大气局、美国科学基金会等资助建立的,提供全球范围冰、雪数据资料(包括南北极海冰)。本文用于分析南极海冰范围和运动特征的数据来自 NSIDC 发布的月平均海冰运动格点数据^[17,18],海冰运动数据集以格点和非格点(原始)文件形式提供了 1979 年至今的每日海冰运动矢量,它是由 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)、SMMR(Scanning Multichannel Microwave Radiometer)和 SSM/I(Special Sensor Microwave/Imager)测得的每日海冰运动数据获得的。本文选取的时间范围为 1979 年 1 月到 2014 年 12 月,数据的空间覆盖范围都是 53.2°S 到南极大陆沿岸,分辨率是 25 km,投影方式是极地等面积方位投影。

美国气象环境预报中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)和美国大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)联合制作的 NCEP/NCAR 再分析数据集,采用当今最先进的全球资料同化系统和完善的数据库,对各种来源(地面、船舶、无线电探空、测风气球、飞机、卫星等)的观测资料进行质量控制和同化处理,形成了一套完整的再分析资料集。它不仅包含的要素多、范围广,而且延伸的时段长,是一个综合的数据集。本文选择 NCEP/NCAR 发布的海表面月平均风速数据来分析海冰运动与风速的关系,时间与空间范围与海冰运动速度数据一致,空间分辨率是 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

NSIDC 提供的海冰运动格点数据中每个网格包

含 3 个分量 u 、 v 和第 3 个变量(像素值为 0 表示该处无海冰)。本文海冰运动矢量计算不考虑方向,根据 $s = \sqrt{u^2 + v^2}$ 计算第 3 个变量为非 0 的网格点处海冰运动速度,通过累加再平均即得到月平均海冰运动速度。

2 结果与分析

为了分析不同海区海冰运动变化,分别以南极整体、2 个主要子海区威德尔海和罗斯海作为研究区域(图 1)。利用获取的海冰运动速度数据分析研究区月平均和季平均海冰运动速度变化情况。春、夏、秋、冬季分别为 10 – 12 月、1 – 3 月、4 – 6 月、7 – 9 月。

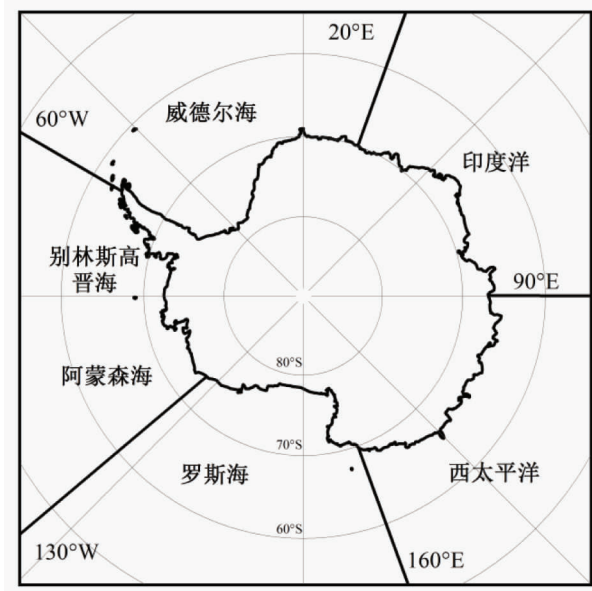


图 1 南极主要海区分布

2.1 海冰运动速度

2.1.1 南极海冰平均运动速度变化

1979 – 2014 年春季海冰平均运动速度 12 月最小,11 月最大。1984 年以前每个月份运动速度相差不大,此后开始出现显著的差异波动。虽然春季各月海冰平均运动速度有所差异,但总体呈现增加趋势(图 2(a))。夏季 3 个月中,1、2 月海冰平均运动速度变化相较 3 月平缓,波动不大且这两个月整体较慢,其中 1995 年 1 月海冰平均运动速度接近于 0。3 月海冰平均运动速度在夏季 3 个月中波动最大(图 2(b))。出现这种情况的原因是由于夏季 3

月的风速明显大于另外 2 个月份,风速的加强使得海冰运动速度明显增加。秋季各月海冰平均运动速度相较于春季和夏季明显上升,3 个月海冰平均速度变化趋势总体相似(图 2(c))。同秋季运动速度变

化相比,冬季的增加趋势则更加显著。冬季(图 2(d))各个月份间差异也比秋季小,只有 7 月出现 2 个较明显的波动点,即 1991 年海冰平均运动速度突降为 91.729 m/h,而到了 2007 年突增到 270.404 m/h。

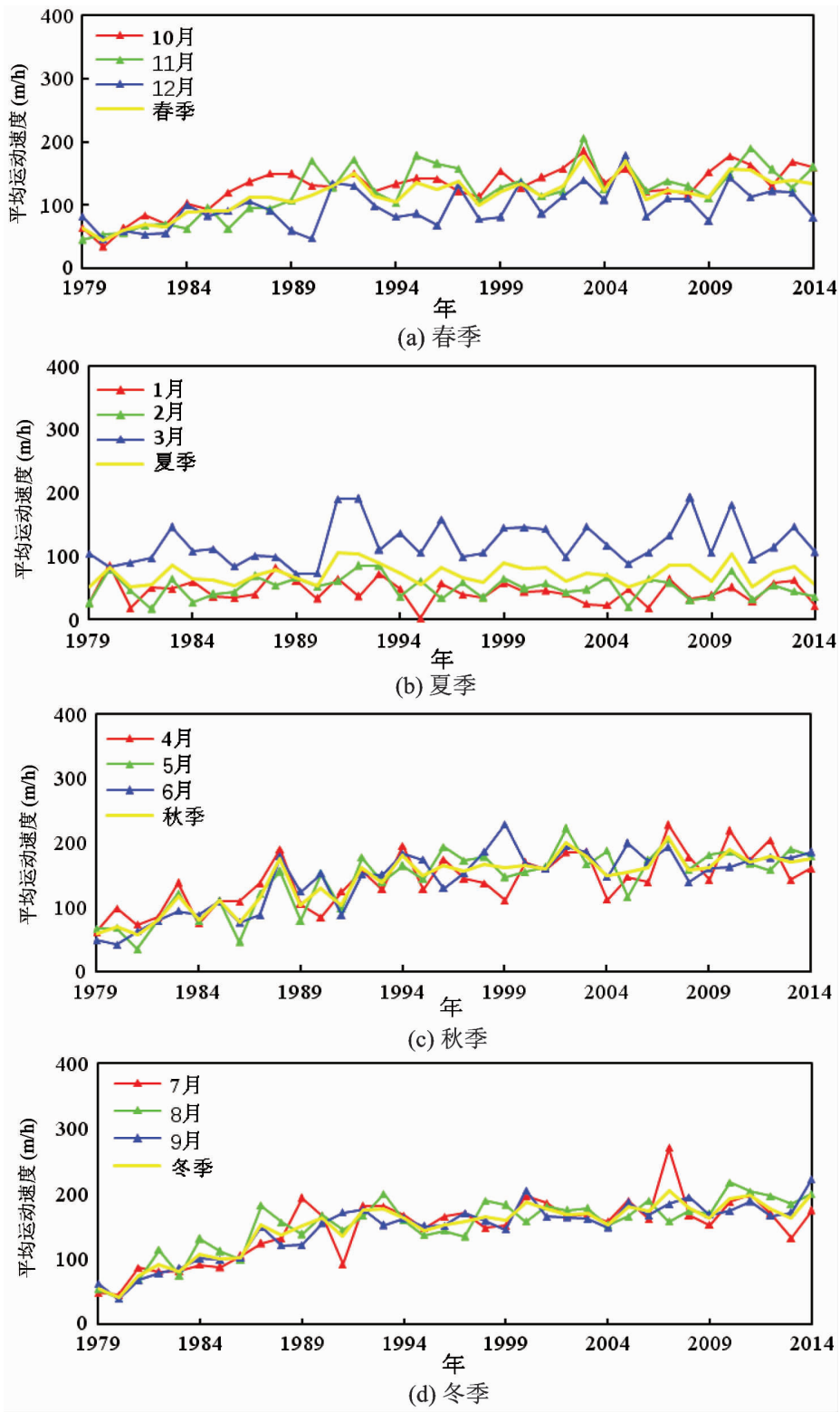


图 2 1979 - 2014 年春季 (a)、夏季 (b)、秋季 (c) 和冬季 (d) 南极各月及季节海冰平均运动速度变化

从季节变化特征看,冬季南极海冰平均运动速度最大,紧接着是秋季、春季,夏季最小。夏季海冰平均运动速度虽然有所波动但总体变化趋势不大,其他季节均呈现波动上升趋势。海冰运动速度季节差异性从 1987 年开始出现,并呈现加快趋势,到 1994 年后季节差异性逐渐稳定。运动速度较大值多出现在近 20 年,这与南极海冰范围近 20 年增长较为显著时间段吻合^[8,10-12]。因此在整个南极海冰范围增加的同时,海冰运动速度也逐渐加快,使得海冰在南极各个海区之间以及与低纬度海域之间的交换情况变得更加频繁。

2.1.2 威德尔海海冰平均运动速度变化

威德尔海是南极洲最大的边缘海,也是海冰存在最多的海区,其西侧被南极半岛阻隔,北部面向开阔大洋(图 1)。南极涡成椭圆形,在威德尔海附近有一个低压中心致使威德尔海附近及外海出现了气旋性的洋流系统,大陆近岸的海流自东向西,南极圈以北的海流则主要自西向东^[5,19,20]。威德尔海存在顺时针的威德尔海环流,该海域常年盛行东北向的海冰环流,这种环流模式将海冰由高纬度海域输出到低纬度海域。因此,研究该海区的海冰平均运动速度变化具有重要意义。

威德尔海春夏季海冰平均运动速度整体相较秋冬季小,最小值出现在 2005 年 2 月份,为 14.309 m/h (图 3(a)、(b))。冬季的海冰平均运动速度相对较大,最大值出现在 1987 年 8 月,达到 304.109 m/h (图 3(c)、(d))。1979 - 2014 年春夏季中 11 月的海冰平均运动速度最大,1 月的海冰平均运动速度最小。春季各月海冰的平均运动速度整体出现加快趋势,而夏季整体表现出略微减慢趋势,与季节性变化一致。秋冬季各月海冰的平均运动速度整体出现加快趋势,同样与季节性变化保持一致,但是冬季各月份海冰平均运动速度相比秋季波动更小。

从季节性变化看,威德尔海秋冬季海冰平均运动速度增加趋势明显,春季也有所增加,夏季整体出现减慢变化。所以 1979 - 2014 年威德尔海海冰的平均运动速度整体上加快。这将导致该海区海冰加速朝东北输出到更低纬度海域,增加海冰覆盖,从而影响南极海冰的整体分布情况,卞林根等^[8]的研究

结果也与本文一致。

2.1.3 罗斯海海冰平均运动速度变化

罗斯海是南太平洋深入南极洲的大海湾(见图 1),同时是南极海冰的第二大分布区。由于其特殊的地理位置和地形条件,罗斯海是南极周边海区中海冰输出最强的海区^[21]。因为与天气尺度相关的气旋漂移模式的控制主要集中在罗斯海东北部,该海区海冰环流的特点是沿海岸东部海冰输入罗斯海相对较弱,西北向输出更强。Josefino 等^[22]发现罗斯海海冰范围在 1978 - 2008 年是南大洋中增长最快的海区。所以研究罗斯海的海冰运动特征变化有助于加深对整个南极海冰变化的认识。

1979 - 2014 年,春夏季(图 4(a)、(b))罗斯海各月份海冰平均运动速度波动较大。春季 3 个月份海冰平均运动速度均呈现增加趋势。夏季 1、2 月海冰平均运动速度变化都较为平缓;3 月由于风速的影响相较前两个月增加明显,其中最大值出现在 2010 年,达到 381.844 m/h。出现这一突变现象是因为 2010 年 3 月的风速明显高出同月份相邻年份风速。秋冬季(图 4(c)、(d))各月海冰平均运动速度也都呈现增加趋势。8 月海冰平均运动速度最大,极大值分别出现在 1990、1998、2003 和 2010 年。

从季节变化来看,罗斯海秋冬季海冰平均运动速度增加趋势比较明显,尤其是冬季。春夏季增加趋势相对较弱(图 4)。因此罗斯海的海冰年平均运动速度呈现加快趋势。因为该海区盛行的西北向海冰环流速度逐年加快,使得罗斯海海冰输运到临近的低纬度海域,导致罗斯海海冰覆盖范围扩大,该结果与前人分析结论基本一致^[8,23,24]。

2.2 风场对南极海冰运动的影响

1979 - 2014 年南极海冰区海面风速在春季、夏季、秋季和冬季都呈增强趋势。秋冬季风速整体比春夏季大,这与海冰运动速度的整体变化趋势一致(图 5)。在 95% 的置信区间上,南极春夏秋季的海冰平均运动速度和风速的相关系数依次是 0.573、0.213、0.632 和 0.682。可以看出冬季关系最强,夏季最弱。海冰年平均运动速度与年平均风速的相关系数为 0.764,说明两者有较强的正相关关系(见图 6)。

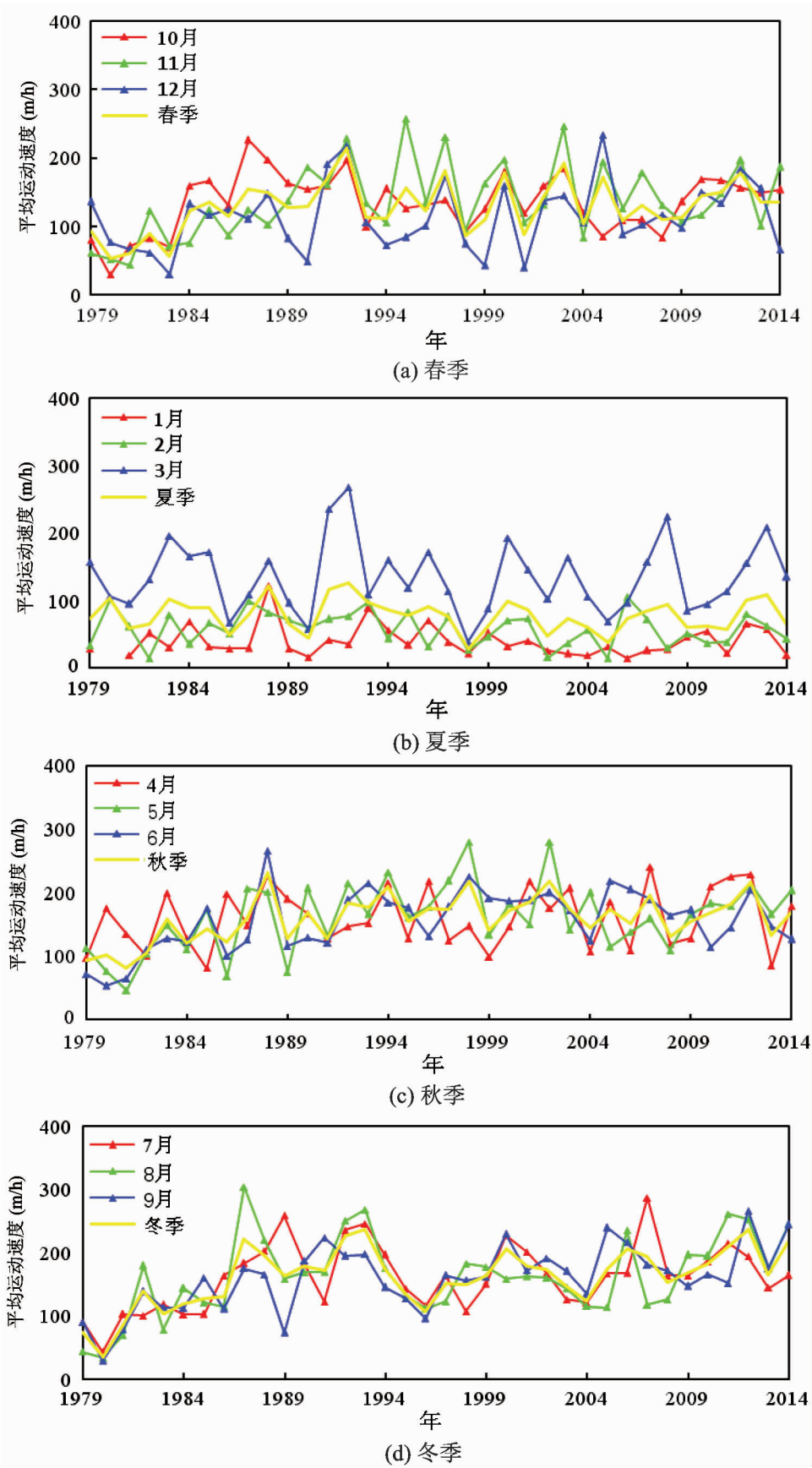


图3 1979 – 2014 年春季(a)、夏季(b)、秋季(c)和冬季(d)威德尔海各月及季节海冰平均运动速度变化

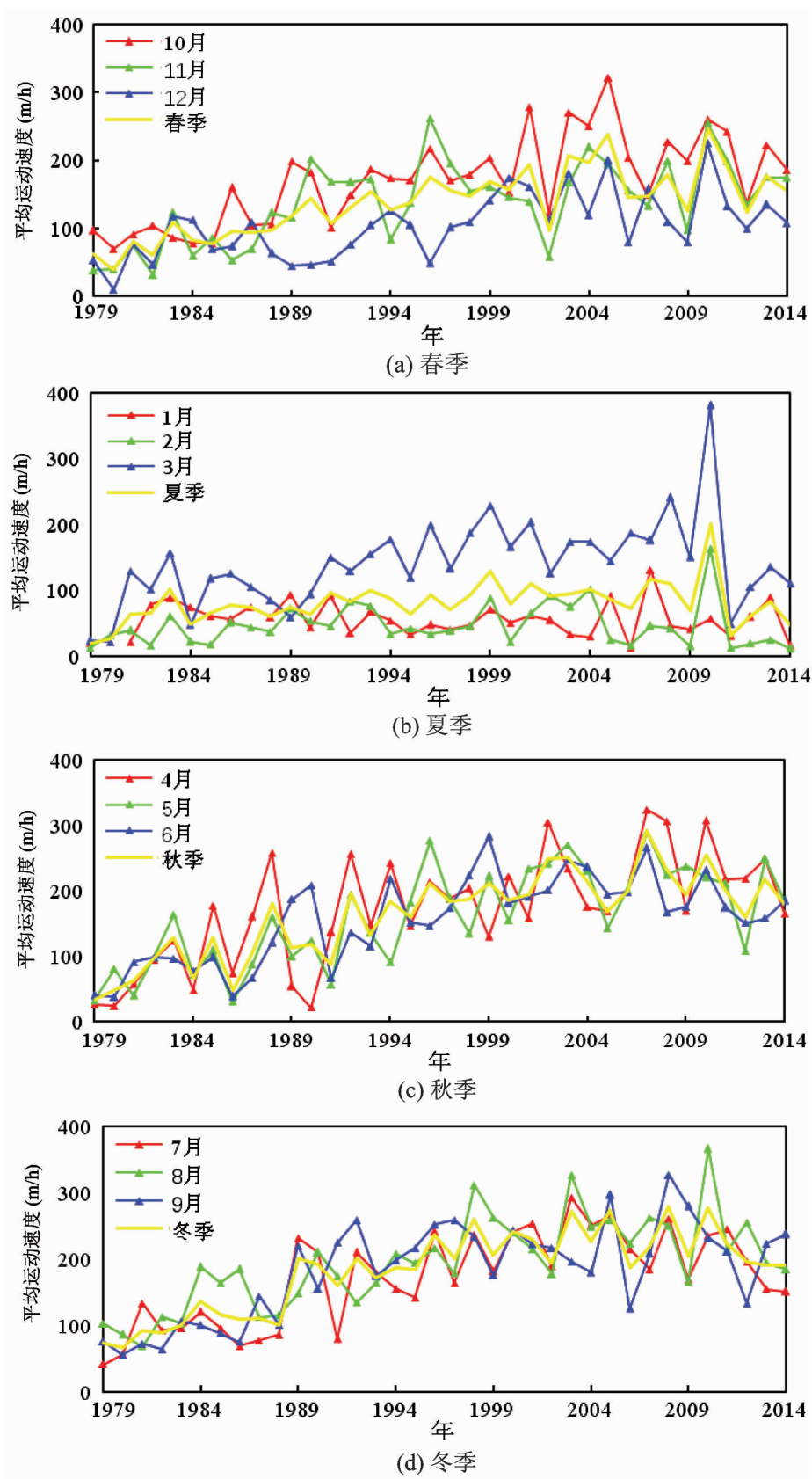


图4 1979 - 2014 年春季(a)、夏季(b)、秋季(c)和冬季(d)罗斯海各月及季节海冰平均运动速度变化

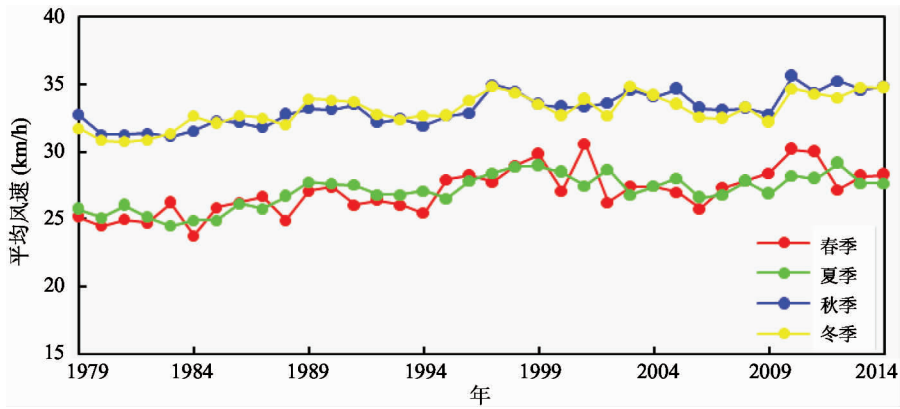


图 5 1979 - 2014 年南极海冰区各季节平均风速变化

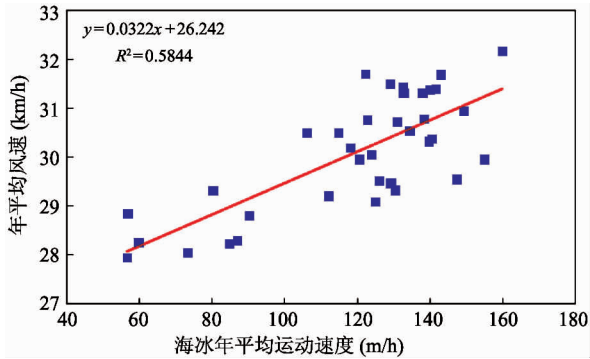


图 6 1979 - 2014 年南极海冰年平均运动速度与风速之间的关系

南极风速增强是导致海冰运动速度加快的一个重要原因。Holland 和 Kwok^[25]发现南极海冰运动与风场有很高的相关性,空间场的相关系数约为 0.52。Zhang^[26]利用模型模拟结果指出南大洋增强的西风会造成海冰的运动速度增加,继而导致海冰总量增加。这些结论都支持本文的研究结果。风速增强,施加给海冰的拖拽力增大,引起海冰发生运动加快。海冰运动加快会增加海冰在南大洋各个海域之间以及南大洋与中低纬度海洋之间的输运和交换^[12],使海冰向北漂移到更低的纬度。

3 结 论

本文用月平均海冰运动数据分析 1979 - 2014 年南极整体以及 2 个子海区的海冰平均运动速度变化,利用月平均风速资料探讨了海冰运动与风速的关系,得到以下结论。

(1) 1979 - 2014 年南极海冰平均运动速度总体上呈增加趋势,冬季海冰平均运动速度最大,接着是秋季、春季,夏季最小。

(2) 由于威德尔海常年盛行东北向的海冰环流,该海区海冰平均运动速度呈现加快趋势,会使更多的海冰加速由高纬度地区向东北向输出到低纬度的海域,从而增加南极海冰的整体分布;罗斯海海冰环流特点是沿海岸东部海冰输入较弱,西北向输出较强,海冰运动速度加快意味着该海区海冰西北向运动速度的加快,海冰将加速向西北向输运,最终扩大南极海冰的覆盖范围。

(3) 4 个季节南极平均风速都呈增强趋势,秋冬季风速整体上比春夏季大。南极海冰的平均运动速度与风速在季节和年平均变化趋势上保持高度一致,两者存在显著的正相关关系,因此风速增大是导致南极海冰运动速度加快的一个重要原因。

(4) 影响海冰运动速度变化的因素较多,本文没有对这些影响因素进行全面、深入地定量分析,只探讨了风速对海冰运动的影响,未来有待进一步探讨。

参考文献

[1] 董兆乾, 梁湘三. 南极海冰、冰穴和冰川冰及其对水团形成和变形的作用[J]. 南极研究, 1993, 5(3): 1-14

[2] 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

[3] 柯长青, 彭海涛, 孙波, 等. 2002 - 2011 年北极海冰时

- 空变化分析[J]. 遥感学报, 2013, 17(2):452-466
- [4] Comiso J C, Fumihiko N. Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SSMR data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 113(113):228-236
- [5] Bjorgo E, Johannessen O M, Miles M W. Analysis of merged SMMR-SMMI times series of Antarctic sea ice parameters 1978-1995 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 24(4):413-416
- [6] Cavalieri D J, Gloersen P, Parkinson C L, et al. Observed hemispheric asymmetry in global sea ice changes [J]. *Science*, 1997, 278(5340):1104-1106
- [7] Liu J, Curry J A, Martinson D G. Interpretation of recent Antarctic sea ice variability [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(31):2205
- [8] 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
- [9] 王红霞. 基于多源微波遥感的南极海冰探测研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学信息科学与工程学院, 2011. 2-20
- [10] 刘艳霞, 王泽民, 刘婷婷. 1979 – 2014 年南北极海冰变化特征分析[J]. 遥感信息, 2016, 31(2):24-29
- [11] 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: 中国海洋大学海洋环境学院, 2015. 92-95
- [12] 沈校熠, 柯长青, 张杰. 2002 – 2011 年南极海冰变化的遥感分析[J]. 极地研究, 2017, 29(1):163-171
- [13] 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. 2-20
- [14] 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
- [15] Zhang J, Rothrock D A, Steele M. Recent changes in Arctic sea ice: the interplay between ice dynamics and thermodynamics[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(17): 3099-3114
- [16] Light B, Grenfell T C, Perovich D K. Transmission and absorption of solar radiation by Arctic sea ice during the melt season[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2008, 113(C3):682-695
- [17] Tschudi M, Fowler C, Maslanik J, et al. 2016. Polar pathfinder daily 25 km EASE-Grid sea ice motion vectors [EB/OL]. Version 3. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: [http://dx. doi. org/10.5067/O57VAIT2AYYY](http://dx.doi.org/10.5067/O57VAIT2AYYY)
- [18] Stroeve J, Meier W, 2017. Sea ice trends and climatologies from SMMR and SSM/I-SSMIS [EB/OL]. Version 2. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: [http://dx. doi. org/10.5067/EYICLBOAAJOU](http://dx.doi.org/10.5067/EYICLBOAAJOU)
- [19] 郭贤鹏. 基于互相关算法的 Weddell 海海冰运动特性分析[J]. 声学技术, 2016, 35(6):127-130
- [20] Venegas S A, Drinkwater M R. Seaice, atmosphere and upper ocean variability in the Weddell Sea, Antarctica [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, 106(C8):16747-16765
- [21] 邬晓东. 南极罗斯海海冰厚度和面积变化研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学海洋环境学院, 2012. 10-12
- [22] 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*, 2011, 116, C04021
- [23] Cavalieri D J, Parkinson C L. Antarctic sea ice variability and trends, 1979 – 2006[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C7):C07004
- [24] Comiso J C, Kwok R, Martin S, et al. Variability and trends in sea ice extent and iceproduction in the Ross Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C4): C04021
- [25] Holland P R, Kwok R. Wind-driven trends in Antarctic sea-ice drift[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(12):872-875
- [26] Zhang J. Modeling the impact of wind intensification on Antarctic sea ice volume[J]. *Journal of Climate*, 2012, 27(1):202-214

Analysis of kinematic characteristics of Antarctic sea ice from 1979 to 2014

Liu Yige^{* ** ** *}, Ke Changqing^{*}, Zhang Jie^{**}

(^{*} School of Geographic and Oceanographic Science, Nanjing University, Nanjing 210023)

(^{**} The First Institute of Oceanography, State Ocean Administration, Qingdao 266061)

(^{***} Collaborative Innovation Center of South China Sea Studies, Nanjing 210023)

Abstract

In the context of a slow increase in Antarctic sea ice, based on monthly mean sea ice velocity data provided by National Snow and Ice Data Center, the characteristics of the Antarctic sea ice motion in 1979 to 2014 are analyzed. The effect of wind speed on Antarctic sea ice motion is discussed in combination with monthly mean wind speed data. The results show that the Antarctic sea ice velocity is generally increasing from 1979 to 2014, in which the average velocity in winter is the largest, followed by autumn, spring and summer. Sea ice velocity in Weddell Sea and Ross Sea is also accelerating and the average trend of sea ice velocity in winter is stronger than that in summer. The Antarctic sea ice velocity and wind speed are consistent with the seasonal and annual change trends and there is a significant positive correlation between them. Therefore, the strength of wind speed is an important influencing factor for the increase of sea ice velocity.

Key words: Antarctic, sea ice motion, wind speed, remote sensing