

北极海面风场对海冰区域性和整体性变化的影响*

陈 萍, 赵进平**

(中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 北极海冰的快速减退是近年来全球变化最重要的现象,对全球气候产生显著影响。海表面风场是影响海冰变化的核心因素,但风场对各个海域海冰变化的贡献有很大差异,需要深入了解海表面风场对各个边缘海的贡献才能理解北极海冰变化的原因。本文采用 SVD 方法,分析海冰面积显著变化时的矢量风场与海冰密集度变化的关系,探讨风场对各个海域海冰的总体影响及对整个北极海冰变化的贡献。结果表明,各海区海冰密集度的变化都与海面风场有联系,但相关程度有明显差异,表明在有些海域风场起支配性作用,而在另一些海域其他因素的作用也很显著。对海冰产生影响的风场类型主要有三类:纬向风、经向风和气旋式风场。在波弗特海-拉普捷夫海这 4 个海域中,仅有 1 种类型的风场(纬向风或经向风)对海冰产生显著影响,同一海域海冰密集度呈现位相一致的变化。而在其他海域,有 2 种类型的风场(纬向风与气旋式风场,经向风与气旋式风场)影响海冰变化,同一海域的海冰密集度会呈现位相相反的变化。北极海冰的变化是一个整体,各个边缘海的海冰既有各自的变化特点,又有很好的整体协同变化特点。而 2004 年以来,加拿大海盆反气旋式风场与欧亚海盆弱的气旋式风场的整体结构呈现逐渐加强的趋势,有利于北极海冰的进一步减退。

关键词: 海冰密集度;海面风场;奇异值分解;北极边缘海

中图分类号: P727

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2017)08-001-12

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20160212

引用格式: 陈萍, 赵进平. 北极海面风场对海冰区域性和整体性变化的影响研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(8): 1-12.

CHEN Ping, ZHAO Jin-Ping. Impacts of surface wind on regional and integrated changes of sea ice in the Arctic[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(8): 1-12.

在过去 30 年间北极海冰面积出现了快速减退的趋势,尤其是夏季以每 10 年超过 10% 的变化幅度快速减少^[1]。1979 年以来北极海冰经历了从平缓到突变的过程,1997—2012 年北极海冰面积的减少速率是 1979—1996 年的 2.7 倍^[2]。在北极海冰快速减小的大趋势下,多年冰的减小尤为显著,且范围已经收缩到北极中央区 and 加拿大群岛附近^[3]。由于多年冰的大幅度减少,太平洋扇区海冰减退最为严重,2012 年 9 月达到了有史以来的最低值^[4]。同时,北极海冰的厚度变薄,融冰期变长^[5-6]。1980 年代初期,北极中央区的海冰的平均厚度约 3.64 m,到了 2008 年北极中央区海冰的厚度则下降到 1.89 m^[5,7]。北极海冰的减退已经成为北极变化的重要现象,成为全球变化领域的研究热点^[8-9]。

虽然北极海冰整体上呈现减退的趋势,但北冰洋

各个海域海冰的减退速率很不一样,有明显的区域特征。从空间分布年代际变化来看,1979 年以来北极海冰覆盖范围在除白令海外的其它海域均呈下降趋势。2009—2012 年海冰密集度较常年显著减小,东半球密集度减少幅度比西半球更大,尤其是冬春季在巴伦支海,夏秋季在楚科奇海^[10-11]。不仅北冰洋边缘的海冰迅速减小,北极中央区海冰覆盖范围也明显减少,1979—2010 年每年减少约 $1.46 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[10]。因此仔细分析各个区域的海冰变化,对理解整个北冰洋的海冰变化有重要意义。以往对北极海冰的区域变化特征有一些研究成果,使我们能够认识各个区域的海冰变化^[12]。然而,北冰洋各个相邻海域的海冰变化有时是相互关联的,分区域的研究有时使我们难以理解各个海域海冰变化之间的联系。为此,本文既要对各海域

* 基金项目:全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2015CB953900);国家自然科学基金重点项目(41330960);中国极地科学战略研究基金项目(20120102);国家自然科学基金青年基金项目(41406208)资助
Supported by the National Basic Research Program of China(2015CB953900);the Key Project of Chinese Natural Science Foundation(41330960); the Polar Science Strategic Research Foundation of China(20120102);the National Natural Science Foundation of China(41406208)

收稿日期:2016-06-06;修订日期:2016-12-14

作者简介:陈萍(1987-),女,博士生。E-mail:chenping@ouc.edu.cn

** 通讯作者:E-mail:jpzha@ouc.edu.cn

的海冰变化进行深入细致地研究,又要认识海冰区域特征之间的密切联系。

海冰的年际变化是热力学因子和动力学因子共同作用的结果,风场异常在这两种机制中都起到了重要作用^[4,13]。在动力机制上,海表面风场驱动海冰的漂移。在热力学方面,风场通过影响热通量影响海冰的生消过程^[14]。北风能够带来冷而干燥的空气,使得海洋进入大气的热通量增多,有利于海水冻结,不利于海冰融化。相反,较温暖的南风会起到相反的作用^[15-16]。海表面风场在动力学和热力学方面共同影响海冰的变化,风驱动是海冰面积短期变化的主要原因之一^[17]。

文献^[18]研究结果表明,北极海冰的整体特征对各个边缘海的海冰有很大的影响,在此背景下,北极主要边缘海的海冰变化基本上是局地风场与地形地貌共同作用的结果^[19-20],风场的作用是边缘海海冰变化的主要驱动因素。但是,海面风场的驱动作用在各个海域的响应不同,在有些海域是决定性的,而在有些海域的作用较弱,研究区域性风场对海冰的响应对我们认识北极海冰的变化具有重要作用。本文以此为出发点,用奇异谱方法研究北极各海域中海冰的变化对风场距平的响应,进而建立北冰洋各海域海冰密集度变化与风场变化的联系。

1 数据来源及方法介绍

本文使用美国国家冰雪数据中心(NSIDC)提供的海冰密集度 SSM/I 数据^[21],空间分辨率为 25 km × 25 km;日平均海冰密集度资料是从 1989 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日,月平均海冰密集度资料是从 1979 年 1 月—2014 年 12 月。

海表面风场资料来自于 NCEP/NCAR 再分析数据。该资料是由美国国家环境预测中心(National Center of Environment Prediction)和美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research)合作进行的全球数据同化工作而得的结果。本文使用 1979 年 1 月—2014 年 12 月的月平均海表面风场资料,空间分辨率为 1(°) × 1(°)。

奇异值分解方法(Singular Value Decomposition, 简称 SVD)以两个变量场的最大协方差为基础展开,主要用来分解耦合要素的时空场,从而提取它们在时间和空间上的相关信息,旨在最大限度地分离出两场的高相关区,以此了解成对变量场之间相关系数场的空间结构及各自对相关场的贡献^[22-23]。

2 北极各海域海冰变化与风场的关系

海表面风场在动力学和热力学方面共同作用下影响海冰的变化,冬季北冰洋基本上全部被海冰覆盖,海冰密

集度与风场之间的联系不大,只有海冰覆盖面积显著变化时,海冰密集度易受海表面风场的影响^[24-25]。海冰覆盖面积是研究海冰冰情的重要指标^[6,24],但由于不同海域的面积不同,海冰覆盖面积不能用来比较不同海域的冰情状况,为此本文将海冰覆盖面积除以区域面积得到海冰覆盖率 $R(t)$ 来表征海冰覆盖面积的变化。

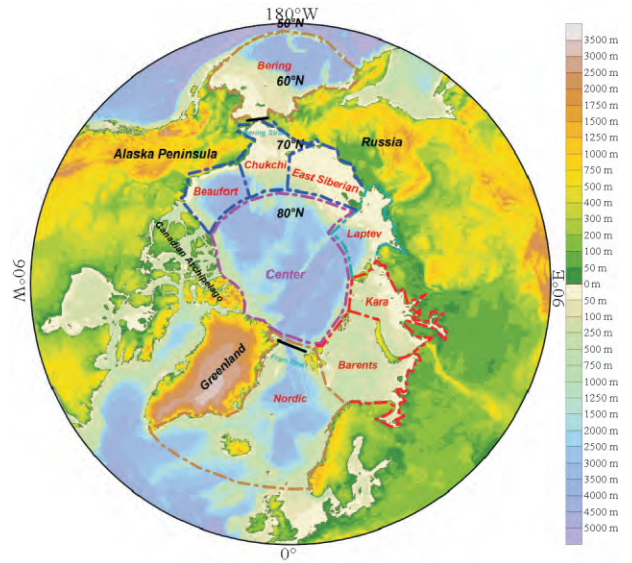


图 1 北极地区海区的划分

Fig. 1 Location map of the regions in the Arctic Ocean

$$R(t) = \int_s c(s,t) ds / S \tag{1}$$

其中: $c(s,t)$ 为 t 时刻 s 处的密集度; $R(t)$ 的计算采用日平均海冰密集度数据; S 为研究区域的区域面积。

为了确定北极各海域海冰面积显著变化的时间段,本文将 1989 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日的日平均海冰密集度数据划分到不同的海域,将北极各海域的海冰密集度数据按照公式(1)进行计算得到海冰覆盖率数据,并做多年平均海冰覆盖率季节变化曲线(见图 2)。

冬季北极中央区、波弗特海、楚科奇海、东西伯利

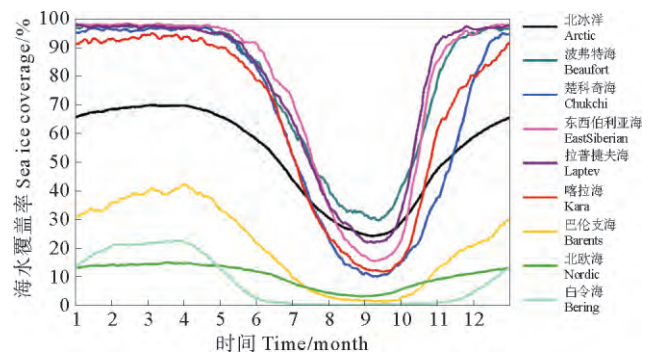


图 2 北极各海域中海冰覆盖率的季节变化曲线^[18]

Fig. 2 The daily average for long-term variation of sea ice coverage for different regions^[18]

亚海、拉普捷夫海和喀拉海全部被海冰覆盖, 多年平均海冰覆盖率高于 90%。这 6 个海域海冰覆盖率在春季 5 月开始显著减小, 到了夏季的 9 月中旬达到最小。其中, 北极中央区夏季最小海冰覆盖率依然高于 65%。波弗特海的多年日平均最小海冰覆盖率大于 30%, 是北极 8 个边缘海中冰情最重的海域。楚科奇海和喀拉海多年日平均的夏季最小海冰覆盖率则接近 10%, 其中北极中央区、波弗特海、东西伯利亚海和拉普捷夫海的海冰覆盖率在 11 月之后无显著变化。而冰情相对较轻的楚科奇海和喀拉海海冰覆盖率显著变化的时间段则为 5—12 月(见图 2)。

巴伦支海、北欧海和白令海在夏季海冰很少或基本无冰, 冬季海冰仍处于冻结-融化过程中。巴伦支海多年日平均的最大海冰覆盖率仅为 42.4%, 而北欧海和白令海相较于巴伦支海冰情更轻。巴伦支海、北欧海和白令

海海冰面积显著变化的时间段分别为 10 月—翌年 7 月, 9 月—翌年 8 月和 11 月—翌年 6 月(见图 2)。

为了分析海冰密集度与海表面风场的相互作用影响, 本文对北极各海域在 1979—2014 年间海冰面积显著变化时间段内的年平均海冰密集度(简称“年平均”海冰密集度)和同期年平均海表面风场做 SVD 分析, 在大部分海域 SVD 的第一模态占有主导地位, 而在有些海域第二模态协方差贡献率大于 20%, 表明有两种模态对该海域有明显贡献, 本文也将予以讨论。

2.1 北冰洋海冰对风场变化的响应

1979—2014 年北冰洋海冰密集度与海表面风场经 SVD 分析, 前两个模态的协方差贡献率分别为 33.4% 和 25.1%, 在统计意义上是显著的。左右场时间系数的相关系数分别为 0.69 和 0.79, 均通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平检验(临界相关系数 $\gamma_{\alpha=0.01} = 0.424$)。

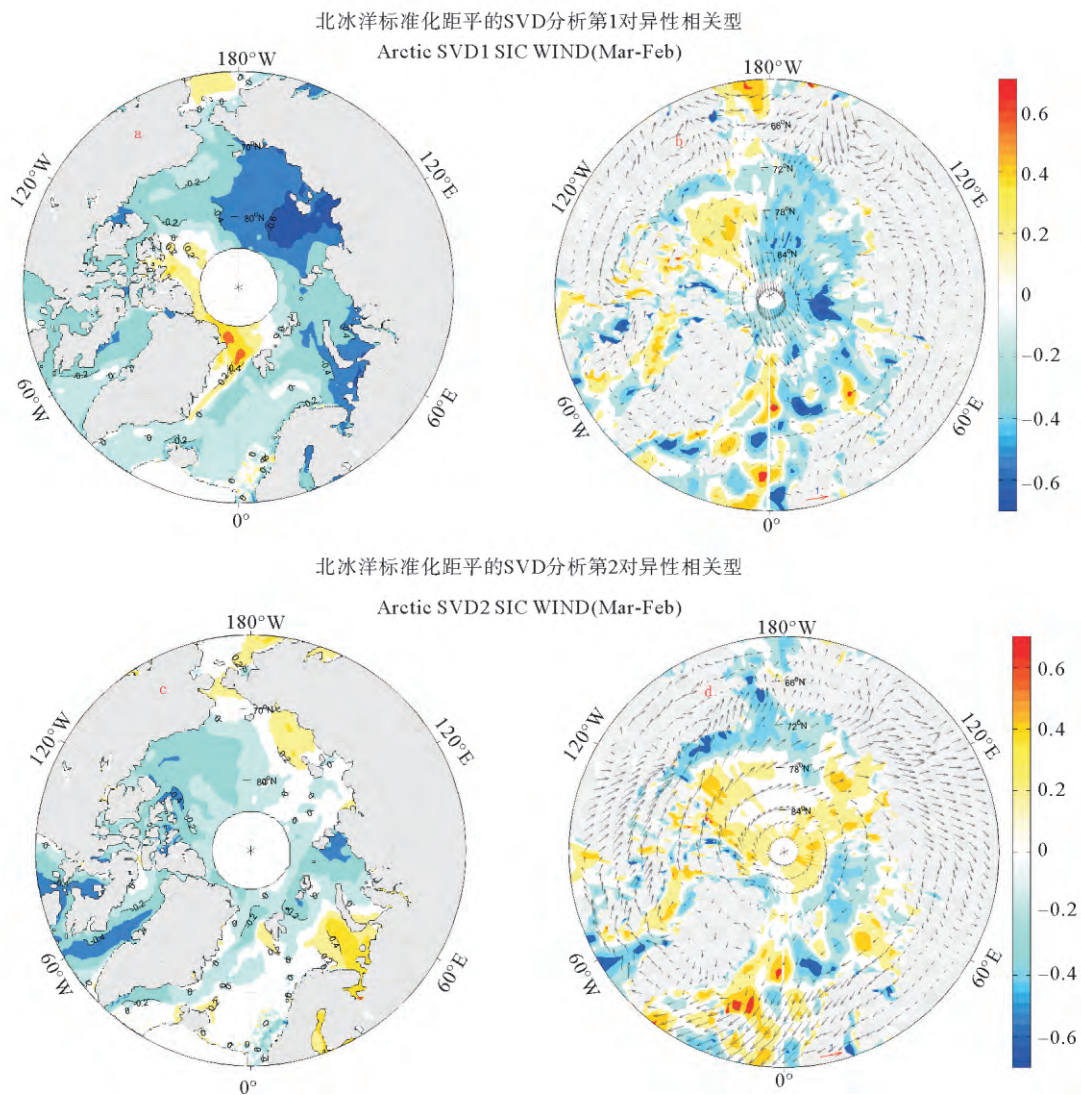


图 3 北冰洋海冰密集度(左场)和海表面风场(右场, 其中色标为风场的散度)标准化距平的 SVD 分析第 1 对异性相关型及北冰洋海冰密集度(左场)和海表面风场(右场, 其中色标为风场的散度)标准化距平的 SVD 分析第 2 对异性相关型
 Fig. 3 Heterogeneous correlation patterns of the SVD1 of sea ice concentration (left field) and wind (right field, the color code is divergence of wind) standardized anomalies over the Arctic; Heterogeneous correlation patterns of the SVD2 of sea ice concentration (left field) and wind (right field, the color code is divergence of wind) standardized anomalies over the Arctic

图 3 显示,北冰洋 SVD1 左场的主要特征为北冰洋大部分海域为负值,中心位于拉普捷夫海-东西伯利亚海及其北部,加拿大-格林兰岛北部区域则为正值。与之相匹配的右场在加拿大海盆为反气旋式分布,整个欧亚海盆区呈现弱的气旋式分布。加拿大西北部的风场辐聚,而整个东半球的风场辐散。这表明当加拿大海盆顺时针风场和欧亚海盆逆时针风场加强(减弱)时,加拿大西北部风场辐聚(辐散),而东半球风场辐散(辐聚),北极大部分海域的海冰减少(增多),仅加拿大-

格林兰岛北部区域的海冰增多(减少)。这与 Lei Ruibo 和 Wang Jia 等的研究结果相一致^[26-27]。

北冰洋 SVD2 左场的主要特征为整个北冰洋基本上为负值。它的右场在北极中央区为反气旋分布,边缘海则为北风。这使得北极中央区风场辐聚,边缘海则以辐散为主。这表明当北极中央区反气旋式风场及南部海域北风加强(减弱)时,北冰洋海冰密集度在减小(增大)。

2.2 波弗特海海冰对风场变化的响应

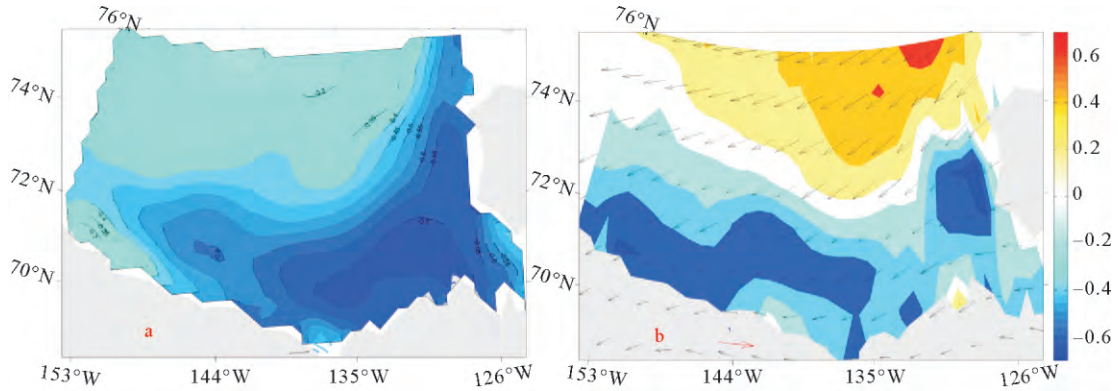


图 4 波弗特海海冰密集度(左场)和海表面风场(右场,其中色标为风场的散度)标准化距平的 SVD 分析第 1 对异性相关型
Fig. 4 Heterogeneous correlation patterns of the SVD1 of sea ice concentration (left field) and wind (right field, the color code is divergence of wind) standardized anomalies over the Beaufort Sea

图 4 显示 1979—2014 年波弗特海海冰密集度与海表面风场的 SVD 分析第一模态的协方差贡献率为 94.2%,在统计意义上是显著的。左右场时间系数的相关系数为 0.62,通过了 0.01 的显著性水平检验。左场的主要特征是整个海域为负值,中心位于东南部海域。与之相匹配的右场为东北风,海域北部风场辐聚,

南部风场辐散。这表明当波弗特海海表面的东北风加强(减弱)时,海域中海冰密集度减小(增大)。

2.3 楚科奇海海冰对风场变化的响应

图 5 显示 1979—2014 年楚科奇海海冰密集度与海表面风场的 SVD 分析第一模态的协方差贡献率为 85.4%,在统计意义上是显著的。左右场时间系数的相

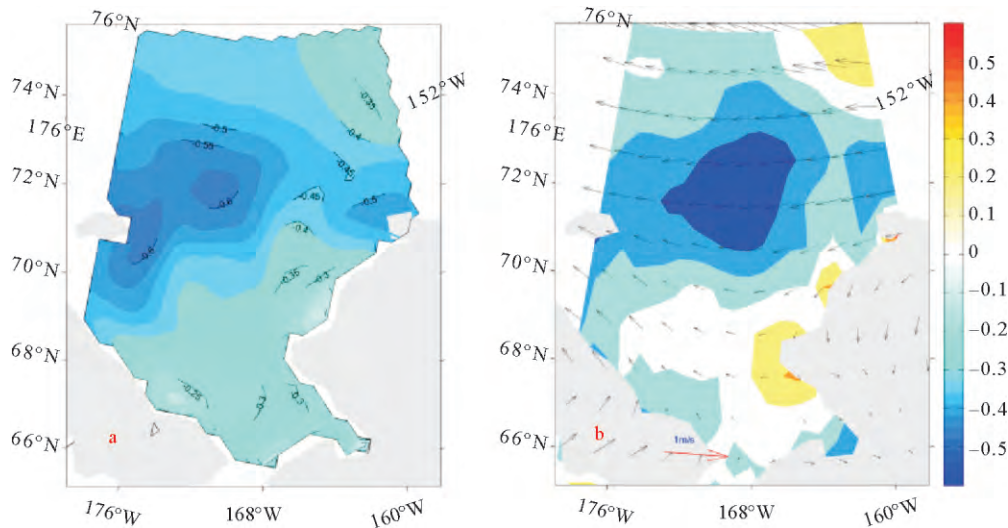


图 5 楚科奇海海冰密集度(左场)和海表面风场(右场,其中色标为风场的散度)标准化距平的 SVD 分析第 1 对异性相关型
Fig. 5 Heterogeneous correlation patterns of the SVD1 of sea ice concentration (left field) and wind (right field, the color code is divergence of wind) standardized anomalies over the Chukchi Sea

相关系数为 0.51, 通过了 0.01 的显著性水平检验。左场的主要特征是整个海域为负值, 中心位于海域中部。与之相匹配的右场为东风, 海域中风场辐散。这表明当楚科奇海海表面东风加强(减弱), 风场辐散(辐聚)时, 海域中海冰密集度减小(增大)。

2.4 东西伯利亚海海冰对风场变化的响应

图 6 显示, 1979—2014 年东西伯利亚海海冰密集度与海表面风场的 SVD 分析的第一模态协方差贡献率为 78.5%, 海冰密集度与海表面风场的时间序列的相关系数为 0.50(通过 99% 的置信度检验)。左场的主要特征是

整个海域为负值, 与之相匹配的右场为南风, 风场辐散(辐聚)时, 海域中海冰密集度减小(增大)。

2.5 拉普捷夫海海冰对风场变化的响应

图 7 显示, 1979—2014 年拉普捷夫海海冰密集度与海表面风场的 SVD 分析的第一模态协方差贡献率为 86.2%, 具有显著统计学意义。SVD1 中海冰密集度与海表面风场的时间序列的相关性系数为 0.58。与东西伯利亚海相似, SVD1 中左场的主要特征是

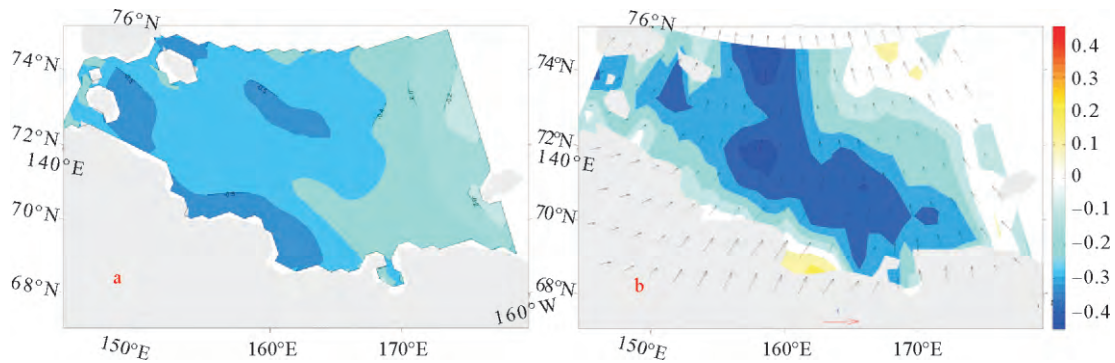


图 6 东西伯利亚海海冰密集度(左场)和海表面风场(右场, 其中色标为风场的散度)标准化距平的 SVD 分析第 1 对异性相关型

Fig. 6 Heterogeneous correlation patterns of the SVD1 of sea ice concentration (left field) and wind (right field, the color code is divergence of wind) standardized anomalies over the East Siberian Sea

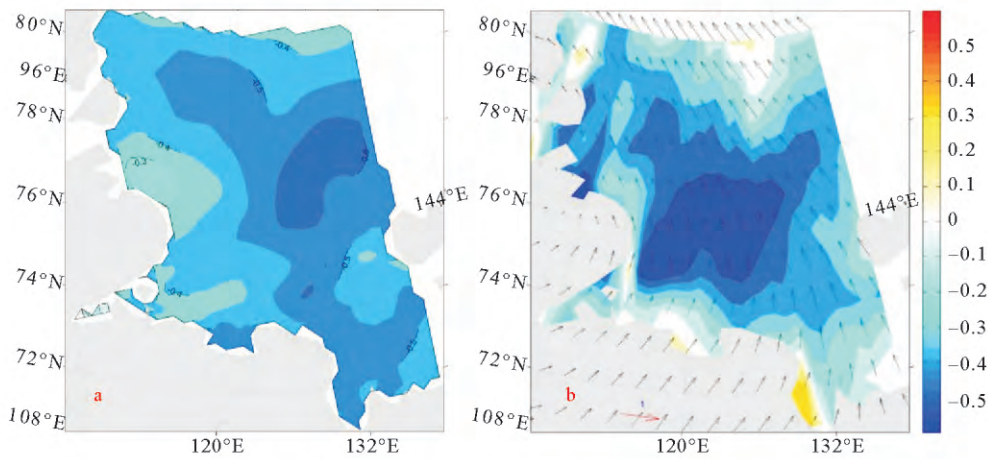


图 7 拉普捷夫海(左场)和海表面风场(右场, 其中色标为风场的散度)标准化距平的 SVD 分析第 1 对异性相关型

Fig. 7 Heterogeneous correlation patterns of the SVD1 of sea ice concentration (left field) and wind (right field, the color code is divergence of wind) standardized anomalies over the Laptev Sea

2.6 喀拉海海冰对风场变化的响应

喀拉海是陆地包围的海域, 没有显著优势的风场, 很难看出海冰密集度的变化与风场的关系。但在海冰变化的过程中, 风场对海冰密集度的影响却很大, 而且很复杂^[28]。1979—2014 年喀拉海海冰密集度与海表面风场经 SVD 分析, 前两个模态的协方差贡献率分别为 44.7% 和 34.0%, 收敛迅速。左右场时间系数的相

关系数分别为 0.58 和 0.44, 均通过了 0.01 的显著性水平检验。

图 8 显示 SVD 分析第一模态中左场呈现出东西反向分布, 与此对应的右场为西风, 风场辐散。表明当喀拉海上方西风加强(减弱), 风场辐散(辐聚)时, 海域西部的海冰密集度减小(增大), 仅靠近北地群岛的东北部海域的海冰密集度有所增加(减少)。SVD2 中左

场主要特征是整个海域为负值,与此对应的右场为气旋式风场,气旋中心位于亚洲大陆西北部沿岸,风场辐散。海冰密集度与海表面风场的时间系数呈正相关,

表明当喀拉海上方气旋式风场加强(减弱),风场辐散(辐聚)时,海域西部的海冰密集度减小(增大)。

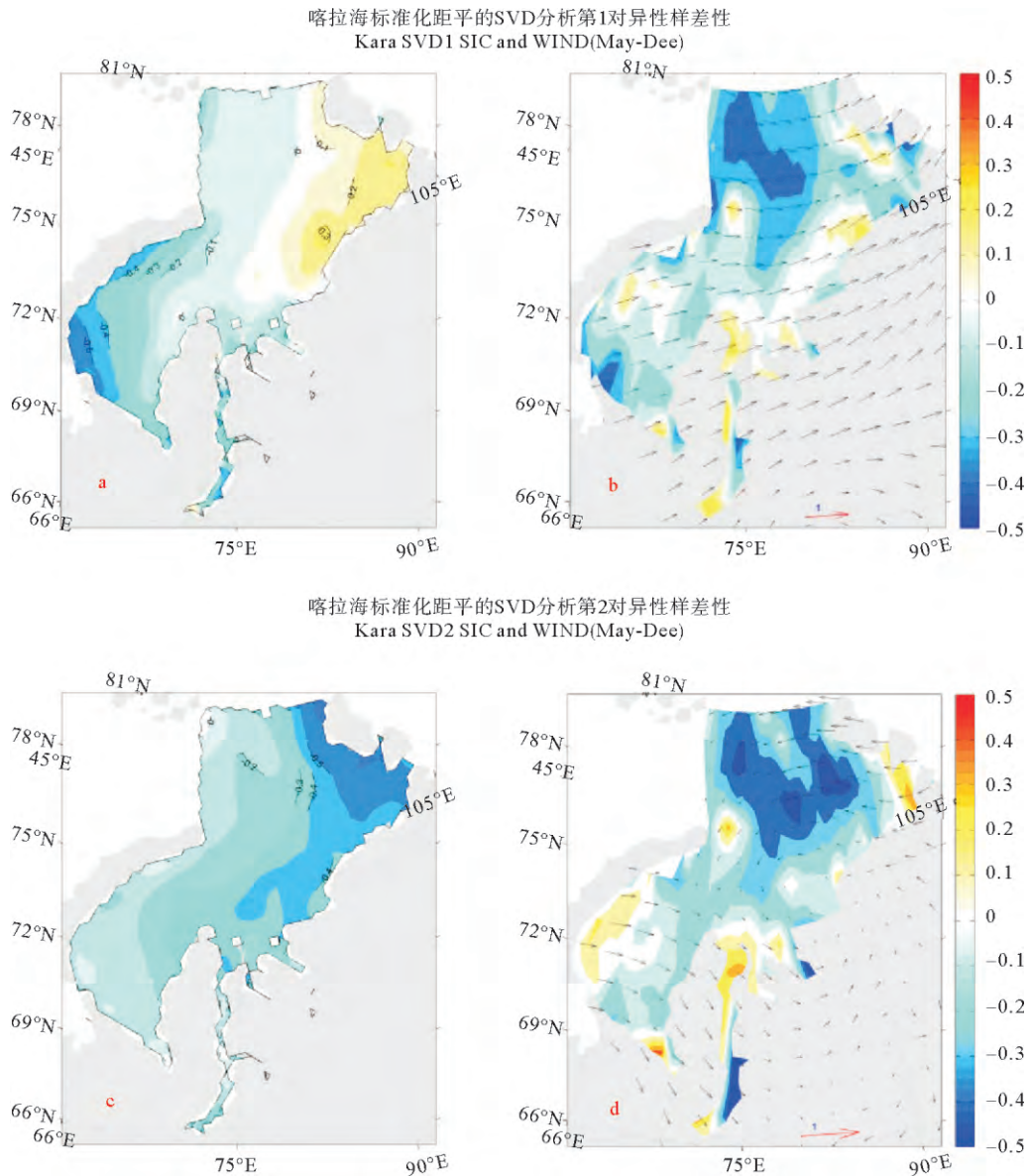


图8 喀拉海海冰密集度(左场)和海表面风场(右场,其中色标为风场的散度)标准化距平的SVD分析第1对异性相关型; 喀拉海海冰密集度(左场)和海表面风场(右场,其中色标为风场的散度)标准化距平的SVD分析第2对异性相关型

Fig. 8 Heterogeneous correlation patterns of the SVD1 of sea ice concentration (left field) and wind (right field, the color code is divergence of wind) standardized anomalies over the Kara Sea; Heterogeneous correlation patterns of the SVD2 of sea ice concentration (left field) and wind (right field, the color code is divergence of wind) standardized anomalies over the Kara Sea

2.7 巴伦支海海冰对风场变化的响应

图9显示1979—2014年巴伦支海海冰密集度和海表面风场SVD分析前两个模态的协方差贡献率分别为49.8%和35.0%,在统计学意义上是显著的。前两个模态中海冰密集度和海表面风场变化的相关性较高,相关系数分别为0.60和0.62,均通过99%的置信度检验。

巴伦支海受大西洋暖流的影响,海域西南部海冰

密集度较小。海冰密集度与海表面风场SVD第一模态中,左场主要特征是中北部海域为负值,与之相对应的右场为南风,中北部海域风场辐散。表明当巴伦支海上方南风加强(减弱),海域中北部风场辐散(辐聚)时,海域中北部的海冰密集度减小(增大)。

SVD2中左场中海域西北部为正值,东南部为负值。与此对应的右场为气旋式风场,气旋中心位于巴伦支海的东北部,海域东南部的风场辐散。而海冰密

集度与风场时间序列的相关系数为 0.62, 表明当巴伦支海上方气旋式风场加强(减弱)时, 海域的东南部海冰密集度减小(增大), 仅靠近斯匹茨卑尔根群岛海域的海冰增多(减少)。

2.8 北欧海海冰对风场变化的响应

北欧海是连接大西洋和北冰洋的通道, 仅在格林兰岛东侧沿岸海域存在海冰。1980—2014 年北欧海海冰密集度与海表面风场的 SVD 分析第一模态的协方差贡献率为 45.1%, 左场呈现反向分布, 格林兰岛东侧沿岸海域为正值, 继续向东则为负值。与之相对应的右场为气旋式风场, 气旋中心位于北欧海和巴伦支海交界处。格林兰岛东侧沿岸海域上方风场辐聚, 而

东侧风场辐散。SVD1 中海冰密集度与海表面风场的时间序列具有很高的正相关, 相关系数为 0.78, 表明当北欧海上方气旋式风场加强(减弱)时, 格林兰岛东侧沿岸海域风场辐聚(辐散), 海冰密集度增大(减小), 继续向东风场辐散, 海冰存在的地方密集度在较小(增大见图 10)。

2.9 白令海海冰对风场变化的响应

1980—2014 年白令中海冰密集度和海表面风场 SVD 分析的前两个模态的方差贡献率分别为 43.2% 和 37.5%, 收敛迅速。这两个模态中海冰密集度与风场的变化相关度较高, 相关系数分别为 0.74 和 0.65, 均通过了 99% 的置信度检验。

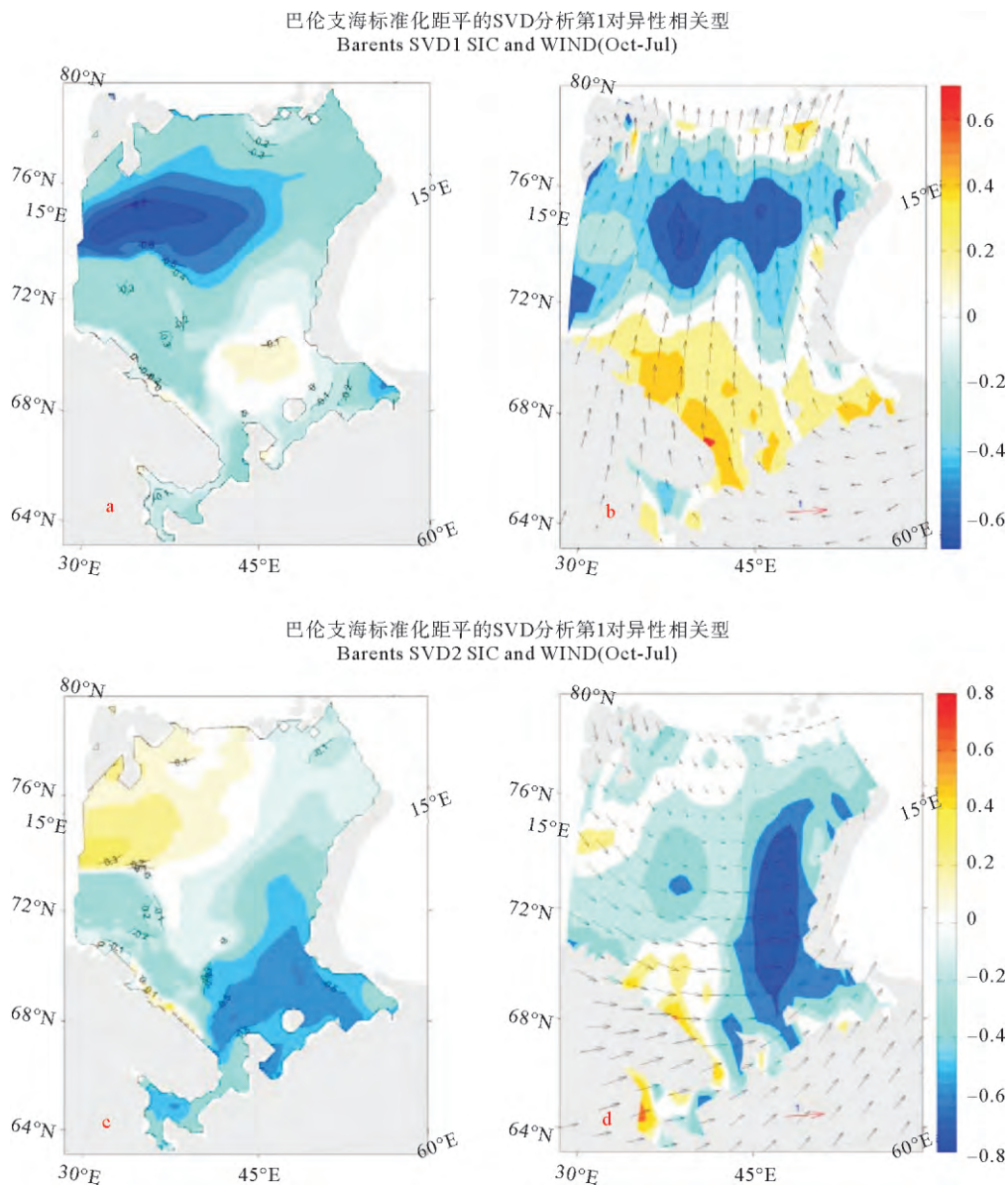


图 9 巴伦支海海冰密集度(左场)和海表面风场(右场, 其中色标为风场的散度)标准化距平的 SVD 分析第 1 对异性相关型; 巴伦支海海冰密集度(左场)和海表面风场(右场, 其中色标为风场的散度)标准化距平的 SVD 分析第 2 对异性相关型

Fig. 9 Heterogeneous correlation patterns of the SVD1 of sea ice concentration (left field) and wind (right field, the color code is divergence of wind) standardized anomalies over the Barents Sea; Heterogeneous correlation patterns of the SVD2 of sea ice concentration (left field) and wind (right field, the color code is divergence of wind) standardized anomalies over the Barents Sea

图 11 显示 SVD1 中左场为正值,与此相对的右场为西北风,海冰存在的海域风场主要显示出辐聚的特征。该模态中海冰密集度与海表面风场的时间序列呈很好的正相关,表明当白令海中西北风加强(减弱)时,海冰存在的区域风场辐聚,海冰密集度增大(减小)。SVD2 中左场呈东西反向分布特征,海域东部为正值,西部为负值。右场为气旋式风场分布,气旋中心位于

白令海的中东部。气旋中心风场辐散,气旋西部风场则辐聚。该模态中海冰密集度与海表面风场的时间序列的相关系数为 0.62,表明当以中东部海域为中心的气旋式风场加强(减弱)时,气旋中心的风场辐散(辐聚),而西部海域上方风场辐聚。此时海域东北部的海冰密集度减小(增大)而海域西北部的海冰密集度增大(减小)。这与 Sasaki 等人的研究结果一致^[13]。

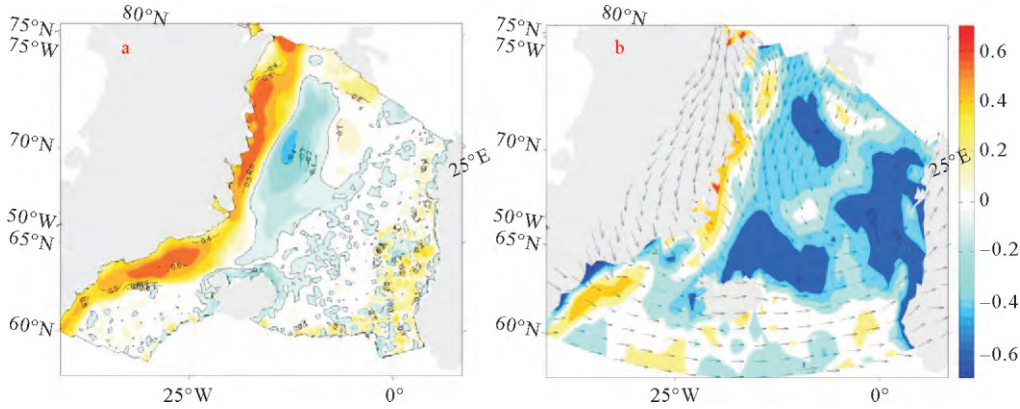
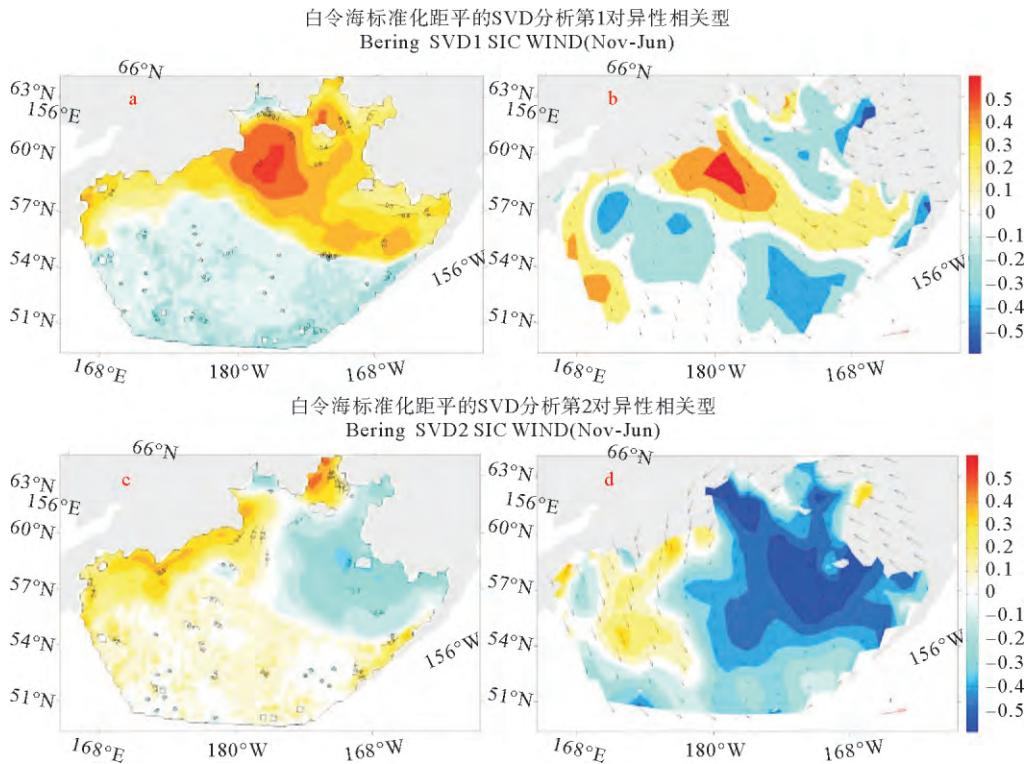


图 10 北欧海(左场)和海表面风场(右场,其中色标为风场的散度)标准化距平的 SVD 分析第 1 对异性相关型
Fig. 10 Heterogeneous correlation patterns of the SVD1 of sea ice concentration (left field) and wind (right field, the color code is divergence of wind) standardized anomalies over the Nordic Sea



白令海标准化距平的SVD分析第1对异性相关型
Bering SVD1 SIC WIND(Nov-Jun)
白令海标准化距平的SVD分析第2对异性相关型
Bering SVD2 SIC WIND(Nov-Jun)
图 10 白令海海冰密集度(左场)和海表面风场(右场,其中色标为风场的散度)标准化距平的 SVD 分析第 1 对异性相关型;
白令海海冰密集度(左场)和海表面风场(右场,其中色标为风场的散度)标准化距平的 SVD 分析第 2 对异性相关型
Fig. 10 Heterogeneous correlation patterns of the SVD1 of sea ice concentration (left field) and wind (right field, the color code is divergence of wind) standardized anomalies over the Bering Sea; Heterogeneous correlation patterns of the SVD2 of sea ice concentration (left field) and wind (right field, the color code is divergence of wind) standardized anomalies over the Bering Sea

3 对海冰产生影响的三种风场类型及成因分析

在上文中作者对北冰洋及其各边缘海的海冰密集度和海表面风场进行了 SVD 分析, 结果发现对海冰产生影响的风场类型主要有三类: 纬向风、经向风和气旋式风场。表 1 给出了引起各海域海冰密集度变化的风场类型。

表 1 北极各海域中对海冰变化产生影响的风场类型

Table 1 The wind field types that impact on the change of sea ice in the Arctic seas

纬向风 Zonal wind	经向风 Meridional wind	气旋式风场 Cyclonic wind
波弗特海 SVD1 Beaufort Sea	东西伯利亚海 SVD1 East Siberian Sea	北冰洋 SVD1\SVD2 Arctic
楚科奇海 SVD1 Chukchi Sea	拉普捷夫海 SVD1 Laptev Sea	喀拉海 SVD2 Kara Sea
喀拉海 SVD1 Kara Sea	巴伦支海 SVD1 Barents Sea	巴伦支海 SVD2 Barents Sea
	白令海 SVD1 Bering Sea	北欧海 SVD1 North European Sea
		白令海 SVD2 Bering Sea

风场在热力学和动力学共同作用下影响海冰的变化^[13], 其中纬向风、经向风和气旋式风场引起海冰变化的机理各不相同, 它们往往与海域周围的陆地岛屿及海流共同作用影响海冰的变化, 下面本文对其一一进行分析。

纬向风 波弗特海、楚科奇海和喀拉海中引起海冰变化的主要风场类型为纬向风的改变。波弗特海上方的东风为离岸风, 海域中东风的加强在动力学方面能够将海域中的海冰向楚科奇和东西伯利亚海输送, 在那里发生快速融化, 之后在穿极流作用下向大西洋输出, 使得海冰密集度减小^[29]; 楚科奇海东风加强时, 风场辐散, 使得海冰向西运移并加入到穿极流, 海冰减少; 喀拉海海冰密集度和海表面风场 SVD 分析第一模态中主要体现了纬向风改变对海冰的影响。纬向西风的加强加速了北角暖流通过喀拉海峡和新地岛北端进入喀拉海, 在热力学方面导致海冰加速融化。喀拉海是一个半封闭海域, 西风的加强同时加速了西侧海冰的东向运移, 使得西侧海冰减少, 由于北地群岛的阻隔作用, 海冰在东北侧堆积, 使得喀拉中海冰密集度出现

了东西反向变化。

经向风 东西伯利亚海、拉普捷夫海、巴伦支海和白令海中经向风的改变都会对海域中的海冰产生影响。经向南风的加强即有利于南部的暖空气进入到该海域, 也有利于海域南部的暖水向北流动, 加快了海冰的融化, 阻止了海冰的冻结。而经向北风的加强在热力学方面有利于海域北侧的冷空气进入到该海域, 在动力学方面能够将海域北侧中央区的大块海冰带入到该海域, 两方面均有利于海冰冰情的加重^[13]。可见经向风的改变在热力学和动力学两方面共同作用对海冰产生影响。

气旋式风场 喀拉海、巴伦支海、北欧海和白令海中的海冰易对气旋式风场的改变做出响应, 海冰的响应方式与气旋式风场的中心位置有关。喀拉海海冰密集度与海表面风场 SVD 分析第二模态中, 右场表现为以亚洲大陆西北部沿岸为中心的气旋式风场。当气旋式风场加强时, 风场辐散, 使得海冰密集度减小。同时海域南部的西风加强, 有利于北角暖流进入喀拉海峡, 使得海冰冰情减弱; 巴伦支海中气旋中心位于海域的东北部。气旋式风场加强时, 风场辐散, 有利于海域中整体海冰的减少; 北欧海中气旋式风场的中心位于北欧海和巴伦支海交界处, 西北部以北风为主。当气旋式风场加强时, 弗拉姆海峡处北风加强有利于将北冰洋的海冰带入到该海域, 使得格林兰岛东侧沿岸海域的海冰密集度增大。东部风场辐散使得海域东部的海冰密集度减小; 白令海中气旋式风场的中心位于白令海的中东部。一方面当气旋式风场加强时, 中东部海域风场辐散, 有利于海冰密集度的减小。同时由于海域西部岛屿的存在, 海域西部风场辐聚, 海冰密集度增大。另一方面当气旋式风场加强时, 海域东部表现为东南风加强, 有利于南部暖空气和暖水的北向流入, 同时有利于海冰向西运移, 因而海域东北部的海冰减少。海域西北部的风场则相反, 造成海域西北部海冰密集度的增大。

北冰洋横跨所有经度, 不同经度的风场有很大差异, 对海冰产生的影响与经度有关。综合上文来看, 北冰洋海冰密集度和海表面风场 SVD1 的结果与各边缘海的结果相一致。右场表现为加拿大海盆反气旋式风场, 欧亚海盆气旋式风场, 这与北极偶极子产生的结果相一致^[26, 29]。当这种组合的风场结构加强时, 即北极偶极子增强时, 有助于加拿大海盆海冰密集度的减小及穿极流的增强, 进而使得北冰洋整体海冰的减少, 仅弗拉姆海峡附近海冰密集度有所增加。

4 讨论与结论

北极海冰变化是最主要的北极变化现象, 国内外

已有大量研究成果^[4,10]。已有的研究表明,海面风场会引起热力学和动力学方面的作用,对海冰的变化产生显著影响^[13],尤其是在边缘海海域,风场与周围陆地的相互影响对海冰的变化有支配性作用^[19-20]。然而,风场并非是海冰变化的唯一因素,在各海域风场对海冰密集度的变化影响有很大的差异。因此,本文对北极海冰和风场的关系分区域进行分析,探讨北极风场对各个海域海冰的影响,以及风场在整个北极海冰变化中的贡献。本文运用 SVD 方法建立密集度变化与风场变化的关系,得出一些新的认识。

(1) SVD 分析结果显示各海区中能够引起海冰变化的风场类型与多年平均气候态风场的分布(图略)较为一致(东西伯利亚海除外)。有些海域仅有一种类型的风场占优势,对海冰产生显著影响:波弗特海-纬向风、楚科奇海-纬向风、东西伯利亚海-经向风和拉普捷夫海-经向风。这些海域,海冰密集度受风场影响,在全海域的变化位相基本一致。而在有些海域,风场的变化比较复杂,有两种模态的风场变化能对海冰产生显著影响,各模态中的海冰密集度在海域中会呈现相反位相的变化。

(2) 北极各海区的 SVD 分析结果中海冰密集度与海表面风场年际变化的时间序列相关度较高,但相关程度又有显著差异,表明在有些海域风场是海冰改变的核心因素,而在另一些海域其他因素对海冰变化的贡献也很大。对 SVD 分析结果中海表面风场的时间序列(图略)进行研究发现,2004 年以后北冰洋及太平洋扇区的 3 个边缘海中海表面风场的改变均有利于海冰的减退,尤其是 2007 年风场的变化幅度很大,在这一年上述 4 个海区的海冰也在剧烈减少。除北海和白令海外,其它个海域中的海冰在 2012 年均达到了极小值,但只有喀拉海和巴伦支海的风场在这一年发生大幅度改变。这与柯长青和 Chen Ping 等人的研究结果一致^[18,30]。

(3) 北极各海域中风场和海域周围的陆地岛屿及海流共同作用影响海冰的变化,对海冰产生影响的风场类型主要有三类:纬向风、经向风和气旋式风场。其中纬向风和经向风的改变对海冰密集度产生的作用在整个海域中较为一致,而海冰对气旋式风场的响应与气旋中心的位置有关。海流能够将热量带入该海域,影响海域中海冰的变化。而风场带动海冰运移时遇到陆地岛屿会产生堆积,同样引起海冰的变化。

(4) 从北冰洋整体来看,对海冰产生影响的风场类型并不单一,主要特征为加拿大海盆反气旋式风场与欧亚海盆弱的气旋式风场共同作用对海冰产生影响,这与北极偶极子异常产生的结果相一致。表明当这种组合的风场加强时,穿极流增强,北冰洋整体海冰在减少,

仅弗拉姆海峡附近的海冰增多。

从本文的结果看,北冰洋各个海域的海冰变化不同程度地与风场的变化相联系,近些年来海表面风场的变化有利于海冰的减少。

参考文献:

- [1] 张璐, 张占海, 李群, 等. 近 30 年北极海冰异常变化趋势[J]. 极地研究, 2009, 21(4): 344-352.
Lu Z, Zhanhai Z, Qun L, et al. Status of the recent declining of Arctic sea ice studies[J]. Chinese J Polar Res, 2009, 21(4): 344-352.
- [2] Huang F, Di H, Hu B, et al. Decadal regime shift of Arctic Sea ice and corresponding changes of extreme low temperature[J]. Climate Change Research Letters, 2014, 3: 39-45.
- [3] Maslanik J, Stroeve J, Fowler C, et al. Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(13): 1-6.
- [4] Parkinson C L, Comiso J C. On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(7): 1356-1361.
- [5] Kwok R, Rothrock D A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958—2008 [J]. Geophys Res Lett, 2009, 36(15): L15501
- [6] Markus T, Stroeve J C, Miller J. Recent changes in Arctic sea ice melt onset, freezeup, and melt season length[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2009, 114(C12): 1-14.
- [7] Lindsay R W, Zhang J, Schweiger A, et al. Arctic sea ice retreat in 2007 follows thinning trend[J]. Journal of Climate, 2009, 22(1): 165-176.
- [8] Su J, Wei J, Li X, et al. Sea ice area inter-annual variability in the Pacific sector of the Arctic and its correlations with oceanographic and atmospheric main patterns [C]. //The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. Maui, Hawaii, USA: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011.
- [9] Zhang J, Lindsay R, Steele M, et al. What drove the dramatic retreat of arctic sea ice during summer 2007? [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(11): 1-5.
- [10] Cavalieri D J, Parkinson C L. Arctic sea ice variability and trends, 1979-2010[J]. Cryosphere, 2012, 6(4): 881-889.
- [11] 隋翠娟, 张占海, 吴辉斌, 等. 1979—2012 年北极海冰范围年际和年代际变化分析[J]. 极地研究, 2015, 27(2): 174-182.
Sui C, Zhang Z, Wu H, et al. Interannual and interdecadal variability of Arctic sea ice extent from 1979—2012[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2015, 27(2): 174-182.
- [12] Polyakov I V, Alekseev G V, Bekryaev R V, et al. Long-term ice variability in Arctic marginal seas[J]. Journal of Climate, 2003, 16(12): 2078-2085.
- [13] Sasaki Y N, Minobe S. Seasonally dependent interannual variability of sea ice in the Bering Sea and its relation to atmospheric fluctuations[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2005, 110(C5): 1-11.
- [14] Reynolds M, Pease C H, Overland J E. Ice drift and regional meteorology in the southern Bering Sea: Results from MIZEX West

- [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1985, 90(C6): 11967-11981.
- [15] Kimura N, Wakatsuchi M. Relationship between sea-ice motion and geostrophic wind in the northern hemisphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(22): 3735-3738.
- [16] Kimura N, Wakatsuchi M. Mechanisms for the variation of sea ice extent in the Northern Hemisphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, 106(C12): 31319-31331.
- [17] 李涛, 赵进平, 朱大勇. 1997—2005 年北极东西伯利亚海海冰变化特征研究[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(5): 822-828.
Li T, Zhao J P, Zhu D Y. Variations of sea ice cover in east Siberian Sea of Arctic Ocean in 1997—2005[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 822-828.
- [18] Chen Ping, Zhao Jinping. The variation of sea ice extent in different regions of the Arctic Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(12): 1-9.
- [19] Wu B, Overland J E, D'Arrigo R. Anomalous Arctic surface wind patterns and their impacts on September sea ice minima and trend[J]. *Tellus A*, 2012, 64: 1-16.
- [20] Ogi M, Yamazaki K, Wallace J M. Influence of winter and summer surface wind anomalies on summer Arctic sea ice extent[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(7): 1-5.
- [21] National Snow and Ice Data Center. Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data [OL]. http://nsidc.org/data/docs/daac/nsidc0051_gsfc_seaice.gd.html.
- [22] 余辉星. 奇异值分解(SVD)及其在时间序列分析中的应用—算法与问题研究[J]. *信息与控制*, 1990, 19(2): 30-38.
Yu Huixing. Singular value decomposition(SVD) and its applications in time series analysis—algorithms and problems study[J]. *Information and Control*, 1990, 19(2): 30-38.
- [23] 李忠贤, 孙照渤, 倪东鸿, 等. 北太平洋海平面气压场变化与海温的关系[J]. *大气科学学报*, 2009, 32(5): 637-644.
Li Z, Sun Z, Ni D. et al. Relationships between sea level pressure and sea surface temperature anomalies over the North Pacific [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2009, 32(5): 637-644.
- [24] 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): 1-6.
- [25] Kwok R, Spreen G, Pang S. Arctic sea ice circulation and drift speed: Decadal trends and ocean currents [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(5): 2408-2425.
- [26] Lei. Characterization of sea-ice kinematic in the Arctic outflow region using buoy data[J]. *Polar Research*, 2016, 35, 22658, <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v35.22658>
- [27] Wang J, Zhang J, Watanabe E, et al. Is the dipole anomaly a major driver to record lows in the Arctic sea ice extent[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36, L05706, doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL036706>.
- [28] 陈萍, 赵进平, 喀拉海海冰的多年变化特征及其主要成因[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(5sum): 16-23.
Chen P, Zhao J. Multi-Year variations of sea ice in the Kara Sea and its main driving factors [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(5sum): 16-23.
- [29] Wu B, Wang J, Walsh J E. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(2): 210-225.
- [30] 柯长青, 彭海涛, 孙波, 等. 2002 年—2011 年北极海冰时空变化分析[J]. *遥感学报*, 2012, 17(2): 452-466.
Ke C, Peng H, Sun B. et al. Spatio-temporal variability of Arctic sea ice from 2002 to 2011 [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 17(2): 452-466.

Impacts of Surface Wind on Regional and Integrated Changes of Sea Ice in the Arctic

CHEN Ping, ZHAO Jin-Ping

(The Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Rapid reduction of sea ice cover is one of the most significant changes in the Arctic. Strength of sea surface wind field plays a key role in sea ice changes, but spatial variation exists for the contribution of wind in different regions, which explains the controlling mechanism for sea ice changes. Relationship between vector wind and sea ice concentration during the sea ice area change significantly period is analyzed using SVD method, which illustrates the impacts of wind on sea ice in different regions and the entire Arctic Ocean. Our results indicates that though sea ice concentration relates to surface wind to some extent in all regions, degrees of correlation vary substantially between respective regions, proving that except the controlling impact of surface wind, some other factors cannot negligible in sea ice changes. Zonal, meridional and cyclonic wind dominates sea ice changes in the Arctic. In Beaufort Sea, Chukchi Sea, East Siberian Sea and Laptev Sea, only one type of wind (zonal wind or meridional wind) dominates sea ice changes and sea ice concentration changes synchronously in each sea. In the other seas, two types of wind anomaly combine together (zonal and cyclonic wind or meridional and cyclonic wind) to affect sea ice concentration, resulting in an unsynchronized sea ice changes in a sea. Sea ice changes in the Arctic include regional and the overall changes of sea ice. Anti-cyclonic is the dominant factor in Canada Basin while the Eurasian Basin is dominated by weakened cyclonic wind shows a strengthening tendency since 2004, which explains the further decrease of sea ice in the Arctic.

Key words: sea ice concentration; wind; SVD; marginal seas of Arctic

责任编辑 庞 旻