

1982—2001 年与 2002—2021 年北极秋季海冰的时空变化及原因

李淑瑶^{1,2}, 崔红艳^{1,2,3}

(1. 青岛科技大学 数理学院, 山东 青岛 266061;

2. 青岛科技大学 数学与交叉科学研究院, 山东 青岛 266061;

3. 青岛海洋科学与技术(试点)国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266061)

摘 要: 基于北极海冰密集度、海冰范围、大气环流和海温数据, 研究了 1982—2001 年与 2002—2021 年两阶段各 20 a 间北极秋季海冰的时空变化特征及其原因。结果表明, 近 20 a(2002—2021 年)北极海冰密集度的下降中心由过去(1982—2001 年)的楚科奇海及白令海峡一带, 转移至亚欧大陆海岸的巴伦支海附近, 且海冰范围每 10 a 减少量由 $0.44 \times 10^6 \text{ km}^2$ 增长至 $0.72 \times 10^6 \text{ km}^2$, 减少速度加快约 64%。秋季北极海冰范围与海水表面温度 (Sea Surface Temperature, SST)、表面气温 (Surface Air Temperature, SAT) 及比湿 (Specific Humidity) 均呈显著负相关。2002—2021 年的相关系数较 1982—2001 年有所提高, 且与温度相关系数最高的月份提前了一个月。通过对海水表面温度、表面气温、比湿、气压场和风场的经验正交分解 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 可知, 1982—2001 年间, 北极地区的温度及比湿的上升中心集中在楚科奇海及白令海峡一带; 2002—2021 年间, 上升中心则转移至巴伦支海一带。气压场和风场在前后两阶段也出现了中心转移的分布变化。北极地区大气与海洋环流各因素的协同变化影响着北极海冰的消融。

关键词: 北极海冰; EOF; 年际变化; 时空变化

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2022)02-0162-11

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20210129001

引用格式: 李淑瑶, 崔红艳. 1982—2001 年与 2002—2021 年北极秋季海冰的时空变化及原因 [J]. 海岸工程, 2022, 41(2): 162-172. LI S Y, CUI H Y. The spatial-temporal variation of arctic autumn sea ice and its impact factors in 1982-2001 and 2002-2021 [J]. Coastal Engineering, 2022, 41(2): 162-172.

自有海冰卫星观测记录以来, 观测和研究揭示北极秋季海冰范围呈明显的下降趋势^[1-2]。其中, 月平均的海冰范围在 9 月份下降趋势最为明显, 自 1979 年至 2020 年间每 10 a 下降 13.1%^[3]。随着海冰面积降幅的逐年增大, 海冰密集度^[4]和厚度^[5]也在显著下降, 海冰融化期时长显著增加^[6-7]。北极地区一年冰的快速消融^[1-2]导致沿海岸线随之不断退后, 且后退速率显著增加^[8]。同时, 北极海区冰层的变化使得海浪活动增多, 进而加速海岸带的侵蚀^[9]。而另一方面, 随着北极海区如楚科奇海及白令海峡一带的海冰融化^[3-4], 北极新航道的开发已成为可能^[10]。

对于北极海区海冰消融原因的研究, 主要集中在大气环流^[11-12]、海洋环流^[13]等方面。北大西洋和北极之间海冰、空气和水的交换影响着海冰体积的变化^[14]。Ding 等^[15]研究表明, 在 9 月北极海冰范围较低的年份存在反气旋环流异常, 夏季大气环流对 9 月海冰范围下降的贡献可高达 60%。不仅如此, 北极海冰范围的年际变化与夏季海表面气压以及高纬度气温有关^[16], Ogi 和 Rigor^[17]研究表明冬季波弗特海上空西风急流的增强减少了欧洲东部和阿拉斯加北部巴伦支海及白令海峡一带的海冰覆盖范围。关于北极海冰在不同时间段内的时空特征, 柯长青等^[18]利用 AMSR-E(The Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS)海冰密集度数

收稿日期: 2022-01-29

资助项目: 国家自然科学基金重点项目——孟加拉湾盐度多时间尺度变异机制及其气候影响研究(42130406)

作者简介: 李淑瑶(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事极地海冰方面研究. E-mail: lishuyaoqust@163.com

(李 燕 编辑)

据计算得出北极多年冰在 2002—2010 年减少了近 30%, 且外缘线包围面积减少的速度远超 1979—2006 年, 融化区域由波弗特海、楚科奇海等边缘海延伸至北极海区中心一带。张璐等^[19]结合观测和卫星资料数据, 研究得出 1979—2009 年北极海冰覆盖范围呈快速衰减趋势。

本文在前人研究的基础上, 拟利用海冰密集度、海冰范围、海水表面温度、表面气温、比湿、气压场及风场数据, 分析 1982—2001 年及 2002—2021 年两阶段北极秋季海冰融化的时空变化及差异, 并探讨这两阶段北极地区底层大气环流和上层海洋环流的变化特征与规律。

1 数据与方法

1.1 数据

本文采用的海冰数据包括海冰密集度和海冰范围, 其中, 海冰密集度数据用以分析海冰的空间变化, 海冰范围数据用以分析海冰的时间变化。本文选取海洋环流和大气环流变量数据包括海水表面温度 (Sea Surface Temperature, SST)、表面气温 (Surface Air Temperature, SAT) 及比湿 (Specific Humidity)、海表面气压和风场, 从热力学和动力学角度分析 1982—2001 年及 2002—2021 年两个时间段内各变量的变化以及对海冰融化的影响。

海冰密集度数据和海水表面温度数据来自美国国家海洋局^[20] (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 最优插值数据版本 2, 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 海冰密集度以海冰覆盖面积的百分比来表示。月平均海冰范围数据来自美国国家冰雪数据中心^[21] (National Snow and Ice Data Center, NSIDC), 海冰范围指每个格点超过 15% 海冰覆盖的部分, 该数据由被动微波遥感仪器数据集与每日极地网格化海冰浓度计算而来。表面气温、比湿、气压场和风场的月平均数据来自美国国家环境预报与国家大气研究中心^[22] (National Center for Atmospheric Research/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR), 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。上述各变量均选取 $60^\circ \sim 90^\circ \text{N}$, 时间跨度为 1982—2021 年, 月份选取 7—11 月。

1.2 方法

本文采用线性回归方法分析北极秋季海冰密集度的空间分布和北极秋季海冰范围的时间变化, 并分别求出 1982—2001 年与 2002—2021 年两阶段的拟合系数。讨论北极海冰范围与海水表面温度、表面气温以及比湿的逐月的相关系数, 并利用经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 分解方法研究北极底层大气环流和上层海洋环流各变量的时空变化特征以及与海冰密集度变化之间的关系。本文采用的主要方法如下:

1) 线性回归

时间序列 x_t 的样本量为 n , 对应的一元线性回归方程为 $\hat{x}_t = a + bt_t$, 斜率 b 代表所求时间变化, 式中系数 a 和 b 的计算如下:

$$\begin{cases} b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \\ a = \bar{x} - b\bar{t} \end{cases} \quad (1)$$

2) EOF 分解

EOF 分解在气象中常用来分析单一场的空间和时间变化, 又称为空间分解。EOF 代表着模态的空间分布, 主成分时间序列 (Principal Component, PC) 则对应着相应空间模态随时间的变化。将气候要素矩阵 $\mathbf{X}$ 分解

为空间模态及时间序列,也即 $\mathbf{X} = \text{EOF}_{m \times m} \times \text{PC}_{m \times n}$, m 为空间点个数, n 为时间序列长度。本文将海冰密集度、海水表面温度、表面气温、比湿、气压场以及风场的距平矩阵进行 EOF 分解,求矩阵的特征值和特征向量,来探究其空间分布特征与空间模态随时间的变化。EOF 分解的步骤如下^[23]:

将矩阵预处理为距平矩阵 $\mathbf{X}$:

$$\mathbf{X}_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}; \quad (2)$$

计算距平矩阵 $\mathbf{X}$ 与其转置矩阵的交叉积 $\mathbf{C}_{m \times m}$:

$$\mathbf{C}_{m \times m} = \frac{1}{n} \mathbf{X} \times \mathbf{X}^T; \quad (3)$$

计算矩阵的特征值矩阵 $\mathbf{\Lambda}_{m \times m}$ 及特征向量 $\mathbf{V}_{m \times m}$, 二者满足:

$$\mathbf{C}_{m \times m} \times \mathbf{V}_{m \times m} = \mathbf{V}_{m \times m} \times \mathbf{\Lambda}_{m \times m}; \quad (4)$$

其中,

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_m \end{bmatrix},$$

特征值按 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_m \geq 0$ 排列, 每一个特征值对应一个特征向量 EOF , $\text{EOF}_i = \mathbf{V}(:, i)$ 。

计算主成分 PC , 将 EOF 投影于原始数据矩阵, 得到对应的时间系数即主成分:

$$\text{PC}_{m \times n} = \mathbf{V}_{m \times m}^T \times \mathbf{X}_{m \times n}. \quad (5)$$

2 北极秋季海冰的时空变化特征

1982—2021 年北极秋季海冰的时空变化特征如图 1 所示。从 1982—2001 年的空间变化分布可以看出, 海冰密集度的下降海区主要集中在巴伦支海、楚科奇海及白令海峡一带, 在东西伯利亚海至巴伦支海一带也出现了轻微的密集度降低现象(图 1a 和图 1b)。而在近 20 a(2002—2021 年), 秋季海冰密集度在亚欧大陆海岸一带下降显著, 下降中心主要集中在东西伯利亚海到巴伦支海一带(图 1a 和图 1c)。与 1982—2001 年有卫星观测记录初期相比, 空间分布明显不同(图 1b 和图 1c)。对比 2002—2021 年与 1982—2001 年, 海冰密集度的下降中心由波弗特海、楚科奇海及白令海峡一带转移到拉普捷夫海及巴伦支海一带, 并且下降范围及强度也显著增大(图 1b 和图 1c)。

这种海冰密集度下降的趋势, 从 1982—2021 年北极秋季海冰范围的时间序列上也可看出(图 1d)。北极秋季海冰范围异常从 1982 年的 $9.45 \times 10^6 \text{ km}^2$ 到 2012 年的 $6.28 \times 10^6 \text{ km}^2$, 减少了 $3.17 \times 10^6 \text{ km}^2$, 直到 2020 年达到最低值, 仅为 $6.11 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。在 1982—2001 年与 2002—2021 年通过对北极秋季海冰范围的线性回归, 得到这两个阶段海冰范围的下降速度(图 1d)。卫星观测记录初期 1982—2001 年海冰范围每 10 a 下降 $0.44 \times 10^6 \text{ km}^2$, 而 2002—2021 年每 10 a 下降达到 $0.72 \times 10^6 \text{ km}^2$, 下降速度是前一时段的约 1.64 倍(图 1d)。

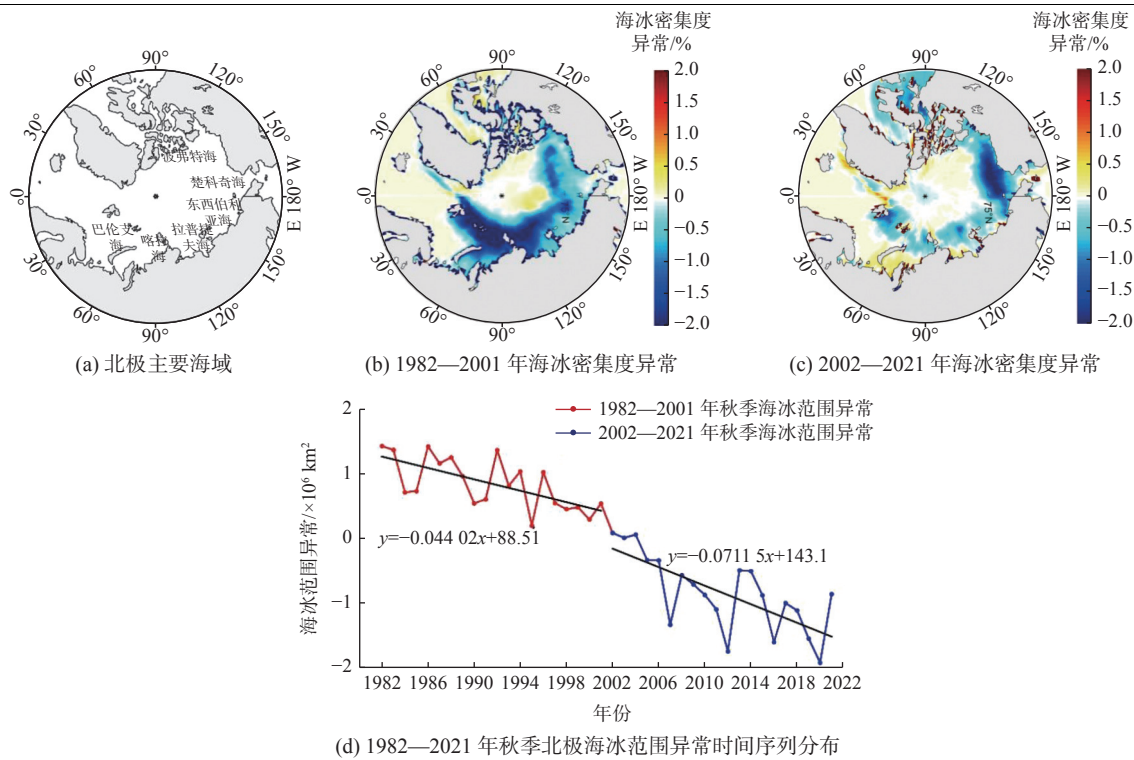


图 1 北极秋季海冰密集度异常变化趋势及秋季海冰范围异常时间序列分布

Fig. 1 Changing trends of the anomalies of Arctic sea ice concentration and time series of the anomalies of Arctic sea ice extent in autumn

3 北极地区底层大气环流和上层海洋环流的变化特征

北极秋季海冰在 1982—2001 年与 2002—2021 年的空间分布及时间序列变化与诸多因素有关^[4]。本文通过分析海水表面温度、表面气温、比湿、气压场和风场在这两个阶段的时空变化特征,来探讨大气环流和上层海洋环流对北极秋季海冰密集度空间分布变化的影响。

为探讨北极海冰的变化与底层大气环流及上层海洋环流的关系,本文计算 1982—2001 年和 2002—2021 年北极秋季海冰范围与海水表面温度、表面气温和比湿在不同月份间的相关性,结果如表 1 和表 2 所示。所选时间段分别为 7—9 月、8—10 月、9—11 月。表 1 和表 2 显示,1982—2001 年和 2002—2021 年北极秋季海冰范围与海水表面温度、表面气温和比湿均呈负相关,且相关性都较高。1982—2001 年秋季海冰范围与海水表面温度的相关系数在秋季(9—11 月)最高,达到-0.81,与表面气温的相关系数在 8—10 月达到最高,为-0.81。海冰范围和比湿相关系数在秋季(9—11 月)达到最高,为-0.78。在 2002—2021 年,秋季海冰范围与海水表面温度、表面气温和比湿的相关系数较 1982—2001 年都有所升高。2002—2021 年间,6—8 月的表面气温与秋季海冰范围相关性最高,相关系数为-0.88;相关性次高的为 8—10 月的海水表面温度与秋季海冰范围,相关系数为-0.87。在表 1 和表 2 中,选取相关性最高的物理量和时间段进行 EOF 分析。

为进一步研究海水表面温度、表面气温和比湿与北极海冰之间的关系,针对上述变量,选取相关性

表 1 1982—2001 年海水表面温度、表面气温和比湿的异常与北极秋季海冰范围异常的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between the Arctic sea ice extent anomalies in autumn and the anomalies of SST, SAT and SH from 1982 to 2001

月 份	相关系数		
	海水表面温度	表面气温	比湿
7—9 月	-0.76	-0.76	-0.66
8—10 月	-0.79	-0.81	-0.77
9—11 月	-0.81	-0.71	-0.78

最高的物理量和时间段进行 EOF 分析,以探讨北极秋季海冰在 1982—2001 年与 2002—2021 年空间分布不同的原因及机制。

北极上空的温度可通过冰-温正反馈机制直接影响北极海冰的融化,而温度的变化也会导致比湿、海表面气压和风场的变化,进而通过冰-比湿、冰-气压或者冰-风场之间的正反馈机制影响北极海冰^[4,14]。图 2 为海水表面温度 EOF 分解第一模态的空间分布及时间序列,正值表示海水表面温度升高,负值表示降低,而全年被海冰覆盖的地区海温变化为零。

表 2 2002—2021 年海水表面温度、表面气温和比湿的异常与北极秋季海冰范围异常的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the Arctic sea ice extent anomalies in autumn and the anomalies of SST, SAT and SH from 2002 to 2021

月 份	相关系数		
	海水表面温度	表面气温	比湿
7—9 月	-0.84	-0.88	-0.56
8—10 月	-0.87	-0.83	-0.76
9—11 月	-0.82	-0.79	-0.81

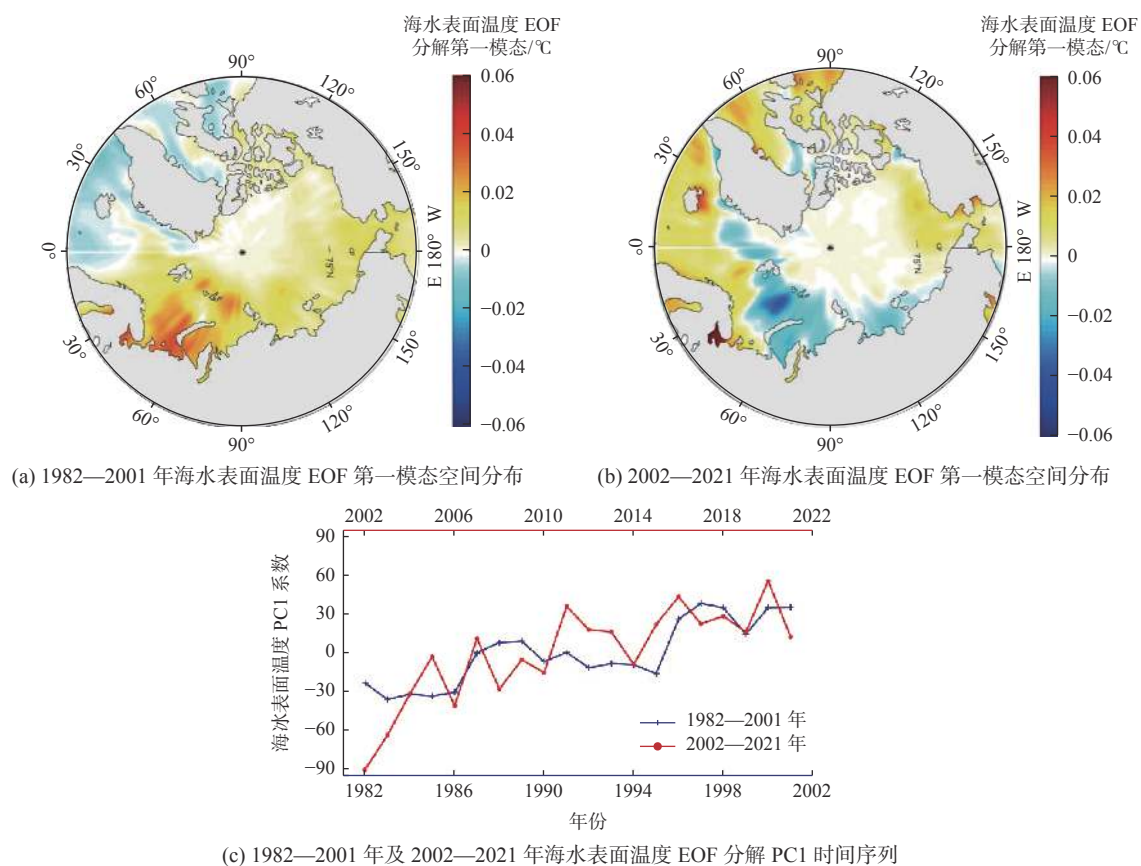


图 2 北极地区海水表面温度 EOF 分解第一模态的空间分布及 PC1 时间序列

Fig. 2 The spatial distribution and PC1 time series of the first SST mode in the Arctic obtained by EOF analysis

图 2a 为 1982—2001 年北极海水表面温度的 EOF 分解第一模态的空间分布。从图 2a 可看出,在 1982—2001 年期间,海水升温主要集中在波弗特海、楚科奇海附近,与图 1b 中秋季海冰密集度在这些区域呈现明显下降的趋势相一致。2002—2021 年 8—10 月海水表面温度的升温区域与 1982—2001 年相比,空间分布有很大不同(图 2b)。在图 2b 中,海水表面温度的升温区域主要集中在亚欧大陆北部的巴伦支海、喀拉海一带,夏末秋初(8—10 月)的海洋变暖导致秋季海冰的冻结放缓,从而造成北极秋季海冰密集度 2002—2021 年期间在这些区域出现明显的下降(图 1c)。从图 2c 海水表面温度 EOF 分解第一模态的主成分时间序列(PC1 时间序列)分布可得出,2002—2021 年间时间系数波动范围大于 1982—2001 年,在

2010—2011 年间时间系数有比较明显的由负到正的突变, 并且在 2016—2019 年间时间系数的变化相对较小。海温是冰-温反馈机制的重要指标, 海温的上升导致海冰的融化, 从而造成开阔水域面积的增加^[13]。由于海水的反照率明显低于海冰的反照率, 海冰的融化有利于海洋表面吸收更多太阳辐射能量, 使海水表面温度上升, 进而加快了海冰的融化^[13]。

表面气温作为地表大气环流的重要变量, 通过冰-温反馈机制对海冰的融化和冻结起重要作用^[24]。本文选择与秋季海冰范围相关性最高的时间段(表 1 和表 2), 分别对 1982—2001 年 8—10 月和 2002—2021 年 7—9 月的表面气温做 EOF 分析, 结果如图 3a 和图 3b 所示。1982—2001 年表面气温在楚科奇海一带出现明显的升温现象(图 3a), 2002—2021 年表面气温则在喀拉海以及亚欧大陆海岸西北部一带出现明显的升温现象(图 3b), 与秋季海冰密集度下降的空间分布一致(图 1b 和图 1c)。图 3c 为北极地区表面温度 EOF 分解的 PC1 时间序列, 1982—2001 年较 2002—2021 年振幅变化相对较大。

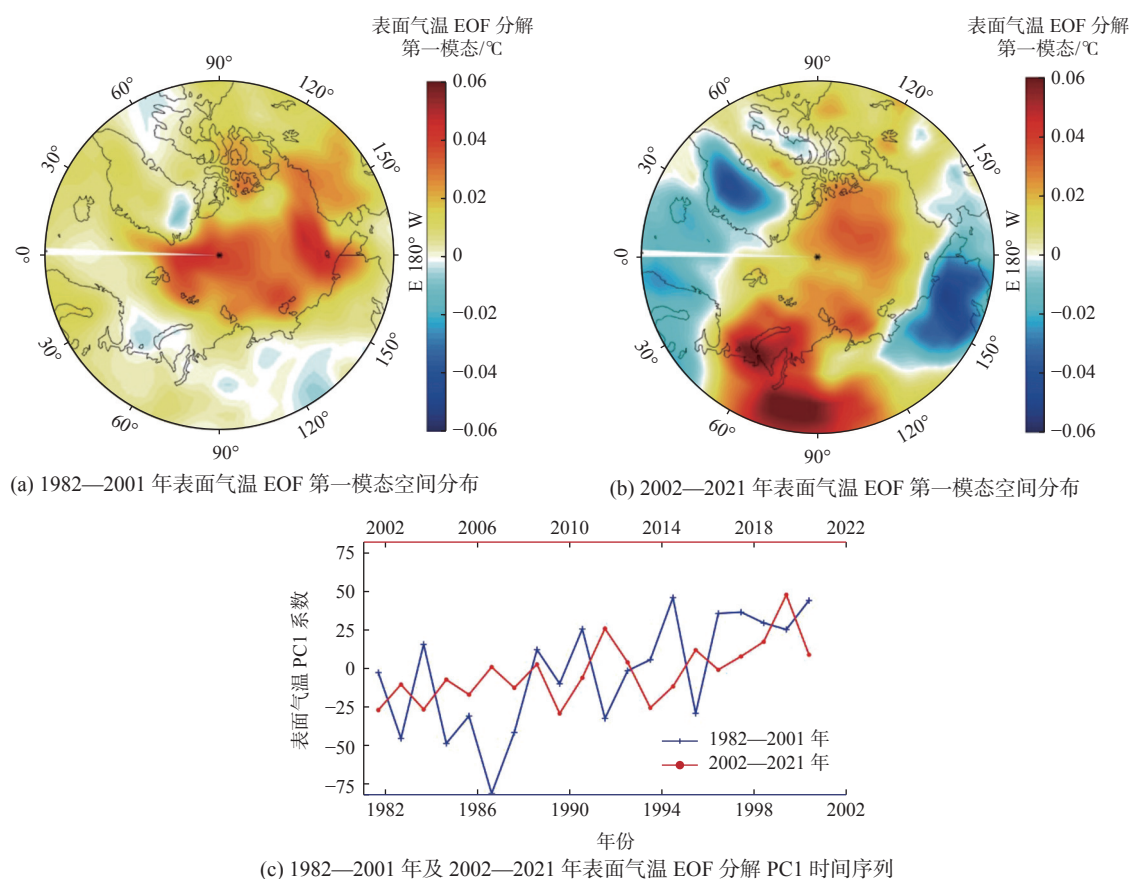


图 3 北极地区表面气温 EOF 分解第一模态空间分布及 PC1 时间序列

Fig. 3 The spatial distribution and PC1 time series of the first SAT mode in the Arctic obtained by EOF analysis

表面气温不仅与海冰的融化息息相关, 还影响着比湿、气压和风场, 从而进一步影响海冰的融化^[4,11]。随着表面气温在北极地区的上升(图 3), 比湿也在楚科奇海、白令海峡、阿拉斯加湾以及巴伦支海一带升高(图 4), 并且这些地区的海冰密集度出现了大幅度下降(图 1)。当空气中水分含量升高、比湿增加时, 相应地又会引起温度升高, 对海冰融化产生间接影响^[14]。

1982—2001 年及 2002—2021 年秋季比湿 EOF 分解第一模态的空间分布如图 4a 和图 4b 所示。可以看出, 在海冰密集度明显下降的区域(图 1), 比湿的数值为正; 1982—2001 年比湿主要在楚科奇海及白令海峡一带升高明显, 巴伦支海也呈现出升高趋势(图 4a), 而 2002—2021 年比湿升高的区域移动到亚欧大陆北部

近岸的巴伦支海以及喀拉海一带(图 4b)。该现象与秋季海冰空间分布变化趋势一致(图 1b 和图 1c)。图 4c 为比湿 EOF 分解第一模态的主成分时间序列分布,比湿的时间系数在 2002—2021 年间的振幅变化显著大于 1982—2001 年间。

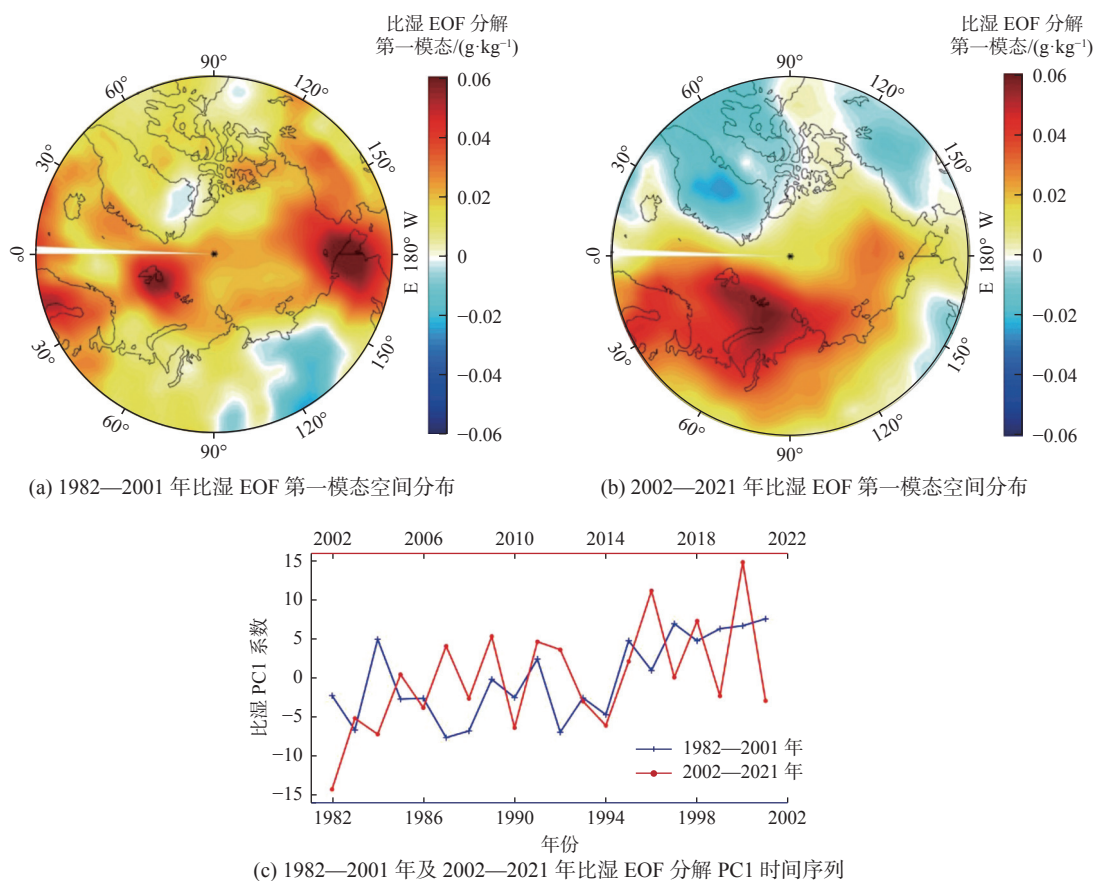


图 4 北极地区比湿 EOF 分解第一模态空间分布及 PC1 时间序列

Fig. 4 The spatial distribution and PC1 time series of the first SH mode in the Arctic obtained by EOF analysis

此外,气压场和风场对海冰的融化也起着重要作用^[4,11]。本文对 1982—2001 年和 2002—2021 年 8—10 月的气压和风场进行 EOF 分析,结果如图 5 所示。1982—2001 年 8—10 月北极海区处于低压模态,地表风从北极吹向波弗特海至巴伦支海一带(图 5a),在该区域海冰密集度下降显著(图 1b)。1982—2001 年风场的 u 分量在北极地区增强(图 5b), v 分量在波弗特海一带增强显著(图 5c)。这种气压场和风场的变化有利于北太平洋地区的热量输入,导致波弗特海以及楚科奇海的海冰密集度的降低。2002—2021 年气压场在欧洲北部和亚洲西部呈高压模态,而在北极呈低压模态,且向格陵兰岛方向延伸呈带状分布(图 5d)。这与 1982—2001 年的表现不同(图 5a)。2002—2021 年风场的 u 分量在北极地区减弱(图 5e), v 分量在北大西洋到北极一带为负值,东西伯利亚海一带为正值(图 5f)。这种气压场和风场的变化使得暖湿气流流入北极地区,导致海冰密集度在亚欧大陆北部的拉普捷夫海到巴伦支海一带降低。气压场形成的气旋风场改变了海冰的环流模态^[24],开阔水域面积的增加导致海水表面吸收更多的太阳辐射^[25],加速了海冰的融化。在东西伯利亚海、波弗特海、拉普捷夫海和喀拉海通过海冰和气压与风场之间反馈机制,造成海冰快速融化。

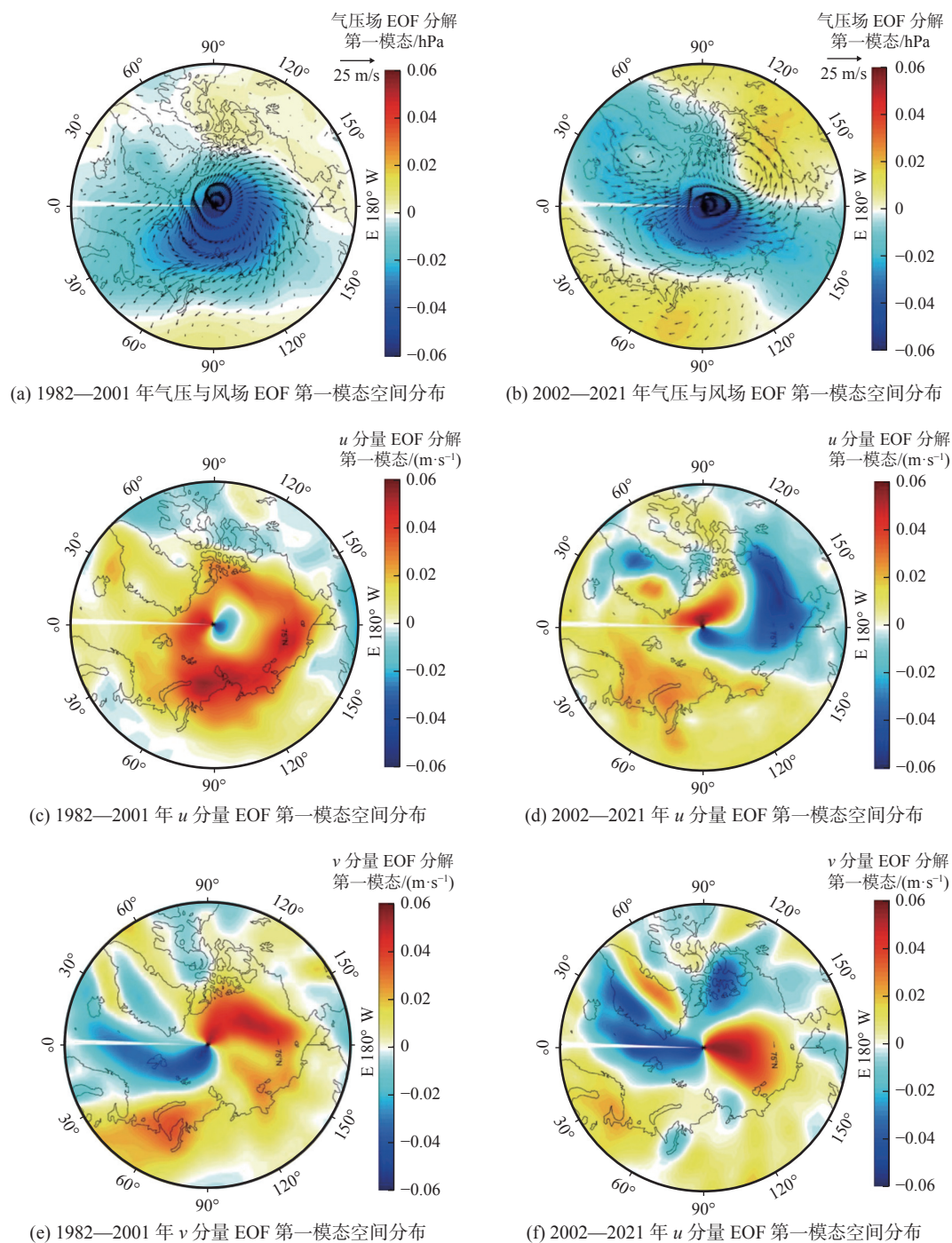


图 5 北极地区气压场和风场 EOF 第一模态空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of the first modes of sea level pressure and wind field in the Arctic obtained by EOF analysis

4 结 论

本文以 40 a(1982—2021 年)的北极海冰范围、海冰密集度数据为基础,结合海温、气温、比湿、气压场和风场分析了北极海冰卫星观测初期(1982—2001 年)以及近 20 a(2002—2021 年)北极海区海冰范围、海冰密集度时空变化的特征。利用线性回归、相关性分析及 EOF 分解,探讨了这两个阶段海冰密集度下降区

域不同的原因。主要结论如下:

本文通过卫星观测数据发现,在 1982—2001 年,北极海冰密集度在波弗特海、楚科奇海和东西伯利亚海一带呈现明显的降低趋势,海冰密集度的下降中心集中在波弗特海、楚科奇海一带,且延伸至白令海峡的部分地区。而在 2002—2021 年近 20 a 间,北极海冰密集度在楚科奇海及白令海峡一带继续降低,并且在巴伦支海一带密集度的下降尤为明显。海冰密集度的下降中心由波弗特海、楚科奇海及白令海峡一带转到亚欧大陆近海岸的拉普捷夫海、巴伦支海一带。

相较于 1982—2001 年,2002—2021 年海冰范围与海水表面温及表面气温的相关性最大的时间提前了一个月,相关系数也大大提高。根据 EOF 方法分析,发现 1982—2001 年表面气温及海水表面温度的升温现象主要集中在白令海峡、楚科奇海以及波弗特海一带,比湿在楚科奇海一带呈现明显的上升趋势。北极地区形成了低压中心,且 v 分量在波弗特海一带增强,暖空气从低纬度吹向高纬度地区,有利于北太平洋热量的输入。这些因素共同作用导致了 1982—2001 年北极秋季海冰密集度在波弗特、楚科奇海以及白令海峡一带下降明显。而在 2002—2021 年期间,表面气温和海水表面温度的升温现象集中在亚欧大陆北部的喀拉海和巴伦支海一带,比湿在拉普捷夫海到巴伦支海一带明显升高。近 20 a 间在北极地区的低压中心形成气旋,造成波弗特海和楚科奇海一带的 u 分量减弱, v 分量增强,气旋风场造成海冰环流模态的改变。这些因素共同作用导致了 2002—2021 年北极秋季海冰密集度在喀拉海、巴伦支海明显下降。

北极海冰的变化不仅体现在海冰范围、海冰密集度等数据上,还体现在海冰的冰龄及海冰厚度等参数中。影响海冰融化的因素有很多,除了本文分析的 3 个反馈机制,还有影响海冰融化的其他因素,如对流层的极地涡旋^[26-27]、云层特性^[28]等,有待进一步研究。随着海洋大气模式的不断发展,利用观测数据与数值模式相结合的方法探讨北极海冰的变化及原因成为可能,对北极新航道的开发具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] COMISO J C, PARKINSON C L, GERSTEN R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(1): L01703.
- [2] WU B Y, OVERLAND J E, D'ARRIGO R. Anomalous Arctic surface wind patterns and their impacts on september sea ice minima and trend[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2012, 64(1): 18590.
- [3] PEROVICH D, MEIER W, TSCHUDI M, et al. Arctic report card 2020: sea ice[R]. United States: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2020.
- [4] LI S Y, CUI H Y, XU J L, et al. Factors contributing to rapid decline of Arctic sea ice in autumn[J]. *Advances in Polar Science*, 2021, 32(2): 96-104.
- [5] 张婷, 张杰, 张晰. 基于 CryoSat-2 数据的 2014—2018 年北极海冰厚度分析[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(3): 425-434. ZHANG T, ZHANG J, ZHANG X. Analysis of Arctic sea ice thickness from 2014 to 2018 based on CryoSat-2 data[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(3): 425-434.
- [6] BELCHANSKY G I, DOUGLAS D C, PLATONOV N G. Duration of the Arctic sea ice melt season: regional and interannual variability, 1979–2001[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(1): 67-80.
- [7] GUI D W, PANG X P, LEI R B, et al. Changes in sea ice kinematics in the Arctic outflow region and their associations with Arctic Northeast Passage accessibility[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(8): 101-110.
- [8] JONES B M, FARQUHARSON L M, BAUGHMAN C A, et al. A decade of remotely sensed observations highlight complex processes linked to coastal permafrost bluff erosion in the Arctic[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(11): 115001.
- [9] 李姝彤, 窦挺峰, 效存德. 海冰覆盖度变化下北冰洋海浪研究进展[J]. *大气科学学报*, 2021, 44(1): 118-127. LI S T, DOU T F, XIAO C D. Research progress for the changes of Arctic Ocean surface wave with diminishing sea ice[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2021, 44(1): 118-127.
- [10] 苏洁, 徐栋, 赵进平, 等. 北极加速变暖条件下西北航道的海冰分布变化特征[J]. *极地研究*, 2010, 22(2): 104-124. SU J, XU D, ZHAO J P, et al. Features of Northwest Passage sea ice's distribution and variation under Arctic rapidly warming condition[J]. *Advances in Polar Science*, 2010, 22(2): 104-124.
- [11] SERREZE M C, STROEVE J. Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373(2045): 20140159.
- [12] CUI H Y, QIAO F L, SHU Q, et al. Causes for different spatial distributions of minimum Arctic sea-ice extent in 2007 and 2012[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(8): 101-110.

- gica Sinica, 2015, 34(9): 94-101.
- [13] OGI M, RIGOR I G, MCPHEE M G, et al. Summer retreat of Arctic sea ice: role of summer winds[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(24): L24701.
- [14] GOOSSE H, GERDES R, KAUKEF F, et al. Influence of the exchanges between the Atlantic and the Arctic on sea ice volume variations during the period 1955–97[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(6): 1294-1305.
- [15] DING Q H, SCHWEIGER A, L'HEUREUX M, et al. Influence of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(4): 289-295.
- [16] OGI M, WALLACE J M. Summer minimum Arctic sea ice extent and the associated summer atmospheric circulation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(12): 12705.
- [17] OGI M, RIGOR I G. Trends in Arctic sea ice and the role of atmospheric circulation[J]. *Atmospheric Science Letters*, 2013, 14(2): 97-101.
- [18] 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*, 2013, 17(2): 452-466. KE C Q, PENG H T, SUN B, et al. Spatio-temporal variability of Arctic sea ice from 2002 to 2011[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2013, 17(2): 452-466.
- [19] 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. ZHANG L, ZHANG Z H, LI Q, et al. Status of the recent declining of Arctic sea ice studies[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2009, 21(4): 344-352.
- [20] National Oceanic and Atmospheric Administration. Physical sciences laboratory: data management[EB/OL]. [2021-12-01]. <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html>.
- [21] National Snow and Ice Data Center. Sea Ice Index, Version 3[EB/OL]. [2021-12-01]. <https://nsidc.org/data/g02135.html>.
- [22] National Oceanic and Atmospheric Administration. Physical sciences laboratory: data management[EB/OL]. [2021-12-01]. <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.derived.surface.html>.
- [23] FU D Y, HUANG Y Y, LIU D Z, et al. Analysis of the regional spectral properties in northwestern South China Sea based on an empirical orthogonal function[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(7): 107-114.
- [24] DESER C, WALSH J E, TIMLIN M S. Arctic sea ice variability in the context of recent atmospheric circulation trends[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(3): 617-633.
- [25] MASLANIK J A, SERREZE M C, BARRY R G. Recent decreases in Arctic summer ice cover and linkages to atmospheric circulation anomalies[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(13): 1677-1680.
- [26] SABELIEVA E. Possible influence of the tropospheric polar vortex on the Barents Sea ice extent in winter[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, 197: 105173.
- [27] OVERLAND J E, WANG M. Recent extreme Arctic temperatures are due to a split polar vortex[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(15): 5609-5616.
- [28] SEDLAR J, TJERNSTRÖM M. Clouds, warm air, and a climate cooling signal over the summer Arctic[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(2): 1095-1103.

The Spatial-Temporal Variation of Arctic Autumn Sea Ice and Its Impact Factors in 1982-2001 and 2002-2021

LI Shu-yao^{1,2}, CUI Hong-yan^{1,2,3}

(1. *College of Mathematics and Physics, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China;*

2. *Research Institute for Mathematics and Interdisciplinary Sciences, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China;*

3. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for*

Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China)

Abstract: Based on the data of Arctic sea ice concentration, sea ice extent, atmospheric circulation and sea surface temperature, the spatial and temporal changes of Arctic sea ice in autumn and their causes in 1982-2001 and 2002-2021 are studied. The results show that in recent 20 years (from 2002 to 2021), the falling center of Arctic sea ice aggregation degree has shifted from the Chukchi Sea and the Bering Strait in the past (1982-2001) to the Barents Sea close to the coast of Eurasian Continent (2002-2021), and the Arctic sea ice extent reduction has increased from $0.44 \times 10^6 \text{ km}^2$ in 1982-2001 to $0.72 \times 10^6 \text{ km}^2$ in 2002-2021 per decade, the reduction speed accelerated about 64%. The Arctic sea ice extent in autumn has a significant negative correlation with seawater surface temperature (SST), surface air temperature (SAT) and specific humidity (SH) and the correlation coefficients in the period of 2002-2021 are higher than those in 1982-2001, with the month when the correlation coefficient with temperature is the highest being advanced one month earlier. Through the analysis of SST, SAT, SH, sea level pressure (SLP) and wind field by using Empirical Orthogonal Function (EOF), it can be seen that the rising centers of temperature and SH in the Arctic Ocean are concentrated in the Chukchi Sea and the Bering Strait in the period of 1982-2001 and transferred to the Barents Sea during 2002-2021. The SLP and wind field also show the changes of center transfer in these two periods of time. It is the variations of the atmospheric and oceanic circulation factors that influence the melting of the Arctic sea ice.

Key words: Arctic sea ice; EOF; inter-annual change; spatial and temporal changes

Received: January 29, 2022