

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2019.10.014

## 3 月北半球海冰趋势变化的区域特征及影响因子分析<sup>①</sup>

陈 樟<sup>1,2</sup>, 吴仁广<sup>3</sup>

1. 成都信息工程大学 大气科学学院, 成都 610225; 2. 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225;  
3. 中国科学院 大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029

**摘要:** 利用海冰密集度资料和海冰范围指数, 分析了 3 月北半球海冰在 1979—1995 年和 1996—2014 年 2 个时间段内的变化趋势以及趋势差异的区域特征. 结果表明: 北半球 3 月总海冰范围以稳定速率减少, 速率无明显加速, 而各个分海域的海冰变化表现出一定的区域差异. 其中, 巴伦支海海冰在 2 个时期内以稳定的速率减少; 白令海海冰不减反增; 鄂霍次克海海冰缩减速度在后期减小; 圣劳伦斯湾的海冰范围在 90 年代中期以前显著增大, 后期缓慢缩减. 3 月海冰趋势变化的空间特征与同期表面气温和表面风场的趋势变化相一致.

**关键词:** 海冰变化趋势; 区域差异; 表面气温变化; 表面风场变化

**中图分类号:** P467

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2019)10-0101-07

极地海冰作为气候系统的重要组成部分, 在气候演变中有着重要作用. 有研究表明<sup>[1-3]</sup>, 海冰可通过改变表面反照率以及大气—海洋之间的热量交换而对表面温度产生影响. 近几十年北极海冰的持续减少可能是导致“北极放大”现象的主要原因之一<sup>[3-4]</sup>. 同时, 海冰的输出、冻结和消融对温盐环流、海洋层结等过程也起着重要作用<sup>[5-6]</sup>.

20 世纪 70 年代以来, 北极海冰的持续减少已经成为一个不争的事实, 海冰的时空变化特征也成为近年来科学界的研究热点. 以往的研究指出, 北半球海冰范围在每个季节都呈现趋势性减少, 其中冬季下降速率最慢; 夏季尤其是 9 月份, 下降速率最快<sup>[7-9]</sup>, 并且, 9 月份北极海冰减少的速度在近十几年存在加速的现象<sup>[9-10]</sup>. 模式结果显示, 本世纪中期至末期可能会出现夏季无冰的北冰洋<sup>[11]</sup>. 此外, 就空间特征而言, 北半球夏季海冰年际异常具有一定的整体性, 即各个主要海区的海冰面积异常基本呈同相变化; 而冬季海冰年际异常则表现出较强的区域性, 巴伦支海、格陵兰海和白令海、鄂霍次克海等海域的海冰呈反相变化<sup>[12-13]</sup>. 不同海域海冰变化趋势的速度大小也不尽相同<sup>[9, 14]</sup>.

北极海冰的变化受到动力学过程和热力学过程的共同影响. 动力学过程主要包括大气环流和洋流的变化. 热力学过程则主要包括温度、海洋热输送等, 其中, 北极地区气温的升高, 强有力地推动了海冰覆盖面积的减少<sup>[7, 15]</sup>. 此外, 海冰—反照率之间的正反馈过程也在夏季海冰面积缩减中扮演着重要角色<sup>[16]</sup>.

过去的工作更多地关注北极夏季海冰的趋势变化, 对北极冬季海冰的变化趋势及其空间特征的研究相

① 收稿日期: 2018-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41705051); 高原大气与环境四川省重点实验室开放课题(PAEBL-2017-Y4); 成都信息工程大学科研基金项目(KYTZ201726).

作者简介: 陈 樟(1989-), 女, 博士, 讲师, 主要从事气候变化研究.

对较少. 本文从线性趋势的角度出发, 分析了北半球 3 月海冰变化趋势的空间特征以及趋势本身在 20 世纪 90 年代中期前后差异的空间特征, 并讨论了表面气温和表面风场对 3 月海冰趋势变化的影响.

## 1 数据

本文使用了 NSIDC(美国国家冰雪数据中心)发布的海冰资料, 包括北半球整体的月平均海冰范围(SIE)指数和月平均海冰密集度(SIC), 后者的空间分辨率为  $25\text{ km} \times 25\text{ km}$ . 文中还采用了 NCEP/DOE(美国国家环境预测中心/美国能源部)提供的空间分辨率为 T62 高斯网格点月平均再分析资料, 变量包括表面气温、表面风场(10 m)、云量、长波辐射通量等.

## 2 北半球 3 月海冰变化趋势的时空特征

图 1 为北半球 3 月总海冰范围的时间序列以及不同时间段内的线性趋势. 海冰范围在 1979—2014 年呈减少趋势, 下降速度为  $-0.039 \times 10^6\text{ km}^2/\text{a}$ . 同时, 北半球 3 月的总海冰范围在 90 年代中期前后的变化趋势基本一致, 斜率分别为  $-0.042 \times 10^6\text{ km}^2/\text{a}$  和  $-0.036 \times 10^6\text{ km}^2/\text{a}$ , 不存在加速现象, 这与前人指出的北半球 9 月海冰范围在 90 年代末加速减少<sup>[10, 16]</sup>截然不同.

为了解北半球各个分海域 3 月海冰的变化趋势及趋势的时间演变特点, 本文分析了北半球 3 月海冰密集度在前期(1979—1995 年)和后期(1996—2014 年)2 个时间段内的线性趋势空间分布. 以往的研究指出<sup>[18-19]</sup>, 诸如北极涛动、北太平洋年代际振荡和北大西洋年代际振荡等现象, 在 90 年代均存在明显的位相转变, 而这些现象对北极海冰变化存在一定影响. 这些结论为分析北极海冰变化趋势在 90 年代中后期的转变原因提供了一定的物理依据.

第一, 无论是前期 1979—1995 年, 还是后期 1996—2014 年, 3 月海冰密集度变化趋势的斜率大值主要位于边缘海区域, 包括白令海、鄂霍次克海、巴伦支海和圣劳伦斯湾, 北冰洋区域变化趋势较弱. 这可能与上述边缘海域主要为季节性海冰, 多年海冰集中在北冰洋区域有关. 第二, 海冰变化趋势在 2 个时期内均具有明显的区域差异. 1979—1995 年, 北半球 3 月海冰密集度的变化趋势呈现偶极子型的空间分布特征, 即白令海、圣劳伦斯湾的海冰和鄂霍次克海、巴伦支海的海冰呈反向变化, 其中白令海和圣劳伦斯湾的海冰增长, 而巴伦支海和鄂霍次克海的海冰减少. 同样, 1996—2014 年的 3 月海冰密集度变化趋势也表现出海域差异, 主要是白令海与鄂霍次克海、巴伦支海、圣劳伦斯湾的海冰反向变化. 第三, 2 个时间段内的趋势差异也表现出一定的区域性. 巴伦支海、鄂霍次克海和白令海的海冰密集度变化趋势在 2 个时间段内的符号基本一致, 但圣劳伦斯湾的海冰变化由前期的增加趋势转变为后期的减少趋势, 同时巴伦支海海冰减少趋势的范围明显向北扩张. 以上分析初步表明, 北半球 3 月的海冰变化趋势以及在 90 年代中期前后的转变都具有一定的区域差异, 应当进行分区研究.

为了进一步揭示北半球 3 月海冰变化趋势在不同海域的时间演变, 分别计算了 4 个海冰变化关键区的海冰范围指数及其线性趋势(图 2). 4 个关键区域分别为巴伦支海、白令海、鄂霍次克海和圣劳伦斯湾. 显然, 海冰的变化趋势具有明显的区域差异. 巴伦支海 3 月的海冰范围在 1995 年前后均表现为显著的减少趋势, 下降速度相对稳定, 2 个时期的斜率分别为  $-0.017 \times 10^6\text{ km}^2/\text{a}$  和  $-0.022 \times 10^6\text{ km}^2/\text{a}$ (图 2-a). 白令

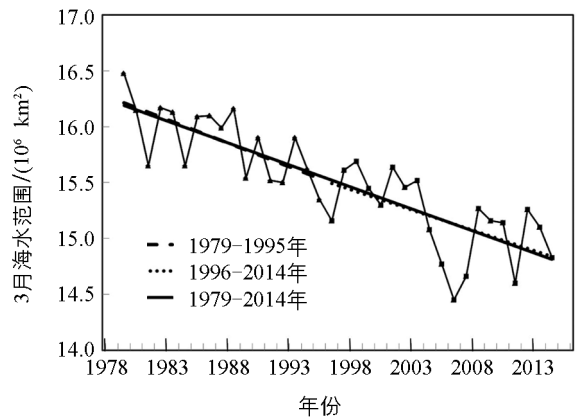


图 1 北半球 3 月海冰范围的时间序列及其在不同时间段内的线性趋势

海 3 月海冰范围在 1979—1999 年间主要为年际振荡, 趋势变化不明显, 但总体仍表现为海冰增多. 随后海冰范围迅速减小, 直到 2007 年急剧回升并维持相对高值. 总体而言, 90 年代末以来, 白令海 3 月海冰范围呈现明显的上升趋势, 且速率大于前期, 存在海冰增多速率加快的现象(图 2-b). 鄂霍次克海 3 月海冰范围在 1979—1995 年间下降趋势明显, 速率为  $-0.029 \times 10^6 \text{ km}^2/\text{a}$ . 1997—2001 年出现大幅度增长, 并于 2001 年达到极值, 随后到 2006 年间又出现了近乎直线的快速下降. 总体而言, 该区域海冰范围在 1996—2014 年仍然在逐渐缩小, 但变化速率小于前期(图 2-c). 圣劳伦斯湾 3 月海冰范围指数在 1995 年前既有年际变化, 又有显著的趋势变化, 总体呈现增长趋势, 年增长率为  $0.013 \times 10^6 \text{ km}^2/\text{a}$ . 1998 年海冰范围急剧减小后, 范围指数整体下移并以年际波动为主. 总体而言, 后期的线性趋势为负, 海冰覆盖范围缓慢缩减, 但未通过显著性检验(图 2-d).

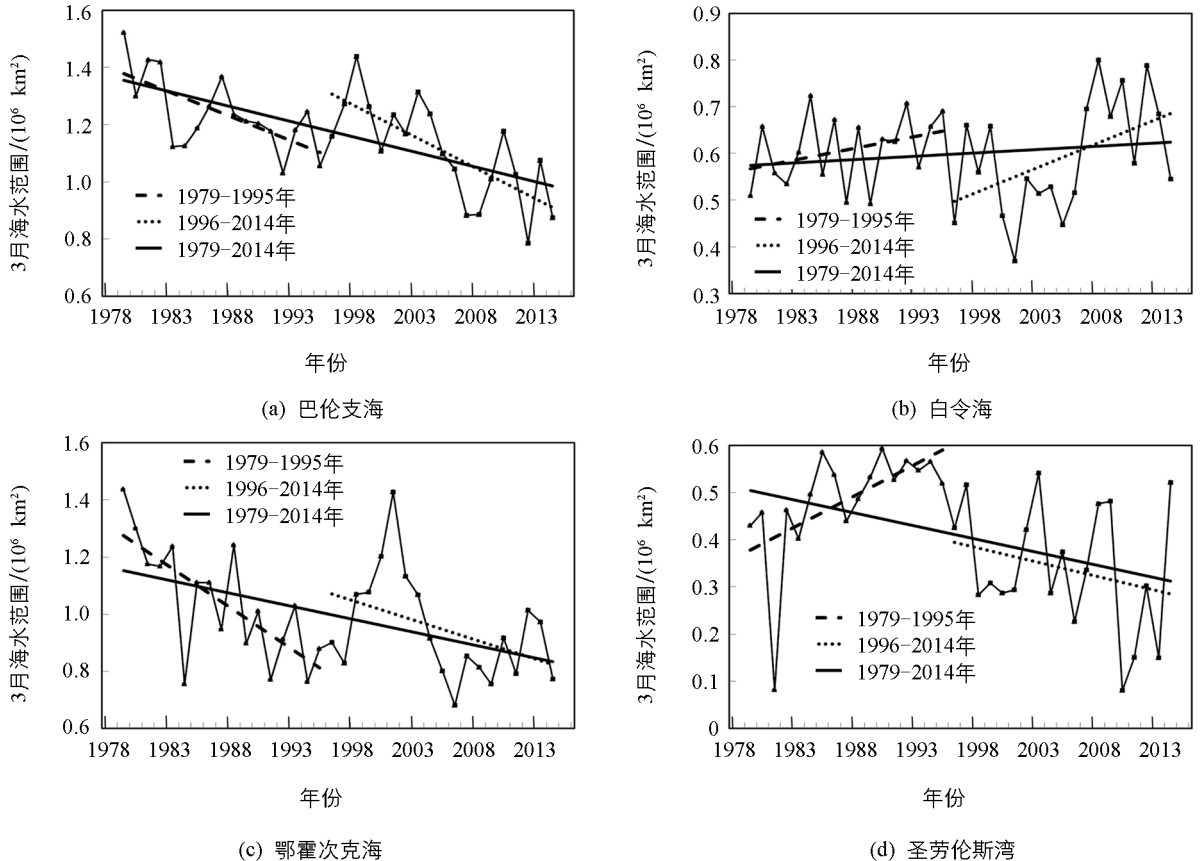


图 2 巴伦支海(a)、白令海(b)、鄂霍次克海(c)和圣劳伦斯湾(d)的 3 月海冰范围时间序列及其在不同时间段内的线性趋势

以上分析表明, 尽管北半球 3 月的总海冰范围以稳定速率减少, 不存在明显的加速现象(图 1), 但不同区域海冰范围的趋势变化特征却存在一定差异(图 2). 因此, 分析海冰变化趋势时有必要进行分区、分阶段研究.

### 3 北半球 3 月海冰变化趋势的影响因子

北极海冰的变化受到温度、风、洋流等诸多因素的影响. 本文仅讨论表面气温和表面风场的作用, 对 3 月表面温度场和表面风场在 2 个时间段内的线性趋势空间分布进行了分析.

#### 3.1 表面气温

1979—1995 年, 表面气温变化趋势呈现很强的偶极子型, 即巴伦支海和鄂霍次克海的海面气温显著升高, 圣劳伦斯湾—巴芬湾和白令海的表面气温显著降低. 对比发现, 气温变化趋势与 3 月海冰密集度变化

趋势的空间分布类似,但趋势符号相反,即气温正(负)趋势对应着海冰负(正)趋势.同时,气温变化趋势的显著区域分布范围更广.1996—2014年,白令海的降温趋势及强度均得到维持;鄂霍次克海、巴伦支海的增温趋势的范围及强度均减弱;圣劳伦斯湾表面气温的变化趋势由前期的显著降低转变为后期较弱的升温;同时北冰洋中部也出现了显著的增温趋势.2个时间段内气温趋势差异的区域特征与海冰趋势差异的空间分布相一致.

进一步计算4个关键海域上空的3月区域平均表面气温及其线性趋势得到图3.同样地,气温趋势的变化也具有明显的区域差异.巴伦支海3月的表面气温在前后2个时间段均呈现升高趋势(图3-a),与该区域海冰趋势减少相对应(图2-a).该区域表面温度和海冰范围之间的相关系数在1979—1995年和1996—2014年分别达到 $-0.74$ 和 $-0.68$ ,均通过95%置信度的显著性检验.白令海上空的3月表面气温在2个时间段内均显著降低(图3-b),对应着该区域海冰范围的增加(图2-b).海冰范围和表面气温的相关系数在2个时段内分别为 $-0.60$ 和 $-0.83$ .鄂霍次克海的表面气温在前期呈升高趋势,在1998年左右迅速降低,随后再次升高,后期总体仍表现为增暖趋势,但速率明显小于前期(图3-c).这些特征均与该海域海冰趋势的变化特征相匹配(图2-c).同时,该区域海冰范围和表面气温的相关系数在2个时间段内分别为 $-0.75$ 和 $-0.74$ .圣劳伦斯湾3月表面气温在前期显著降低(图3-d),与该区域海冰显著增多(图2-d)相对应.1998年后,表面气温呈较弱的正趋势(图3-d),与该区域后期海冰缓慢缩减(图2-d)相对应.2个时间段内海冰范围和表面气温之间的相关系数分别为 $-0.79$ 和 $-0.84$ .

由此可见,3月的气温和海冰范围之间存在显著的负相关关系,表面气温趋势的时空演变特征在一定程度上决定了海冰趋势的时空演变特征.

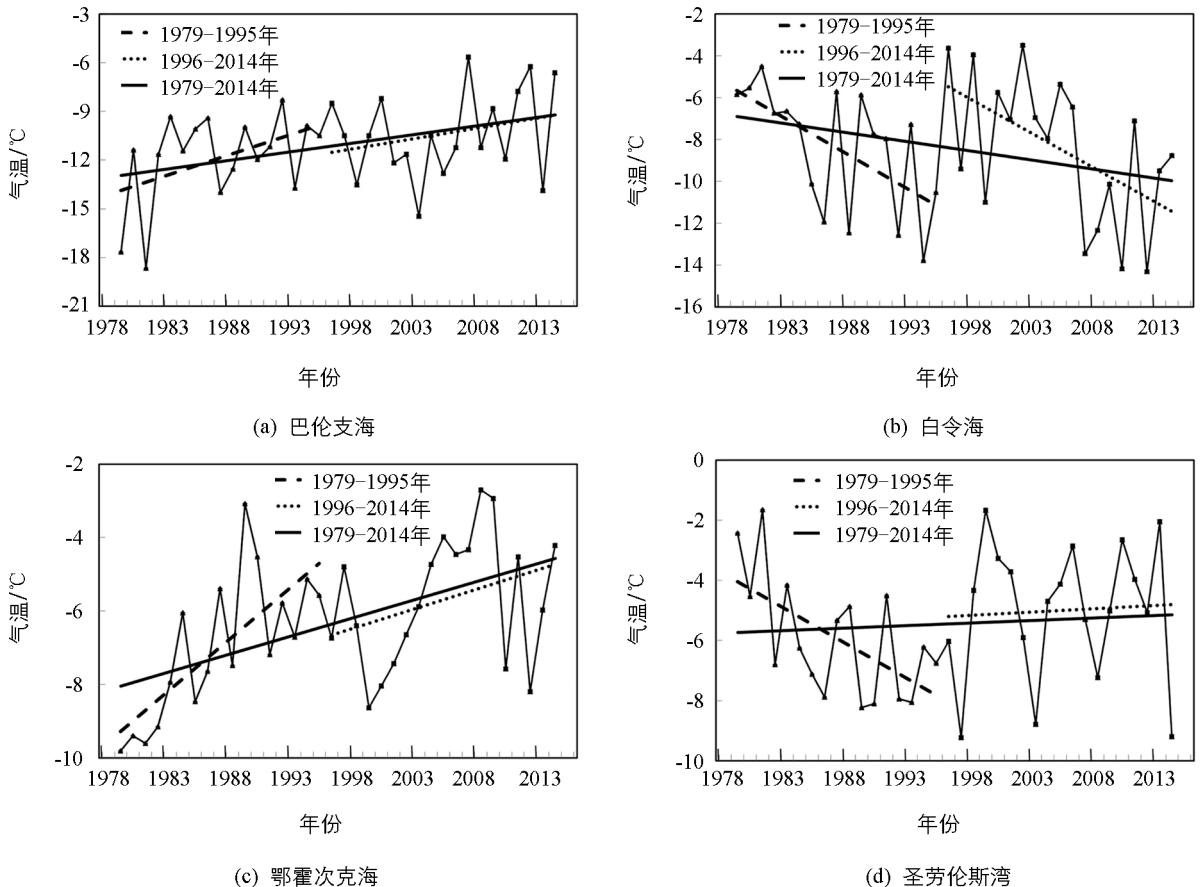


图3 巴伦支海(a)、白令海(b)、鄂霍次克海(c)和圣劳伦斯湾(d)3月区域平均表面气温的时间序列及其在不同时间段内的线性趋势



### 3.2 表面风场

风场一方面可通过驱动温度平流引起表面温度场的改变, 另一方面, 环流场的异常辐合辐散可激发异常的大气垂直运动, 进而改变云量和表面辐射通量. 此外, 异常风场还可影响海冰运动和洋流. 即风场异常可以通过异常的表面热通量和海洋过程两种方式影响海冰的变化. 本文主要讨论表面热通量异常.

1979—1995 年, 北极 3 月表面风场变化趋势的空间分布主要表现为北冰洋区域的显著气旋式环流以及北太平洋高纬度区域的反气旋式环流. 就不同海域而言, 反气旋的东西两侧分别对应着白令海东部的北风和鄂霍次克海的南风. 北风引导高纬度的冷空气南下, 导致白令海东部表面气温降低; 而南风带来低纬度的暖空气, 有利于鄂霍次克海表面气温的升高. 同时, 异常反气旋对应着局地异常下沉运动, 伴随着白令海上空云量的减少; 云量的减少导致向下净长波辐射减少, 从而进一步促使白令海表面气温的降低. 类似地, 鄂霍次克海上空异常南风带来低纬度的暖湿空气, 导致局地水汽增多, 有利于云的形成, 向下净长波辐射增多, 有助于该区域表面气温的升高. 此外, 喀拉海的西南风异常也可通过异常暖平流导致该区域表面气温的增暖. 尽管圣劳伦斯湾的西风趋势不显著, 但它仍能通过将陆地的冷空气带到洋面, 导致该区域表面气温呈现降低趋势. 上述分析结果表明, 前期 3 月的风场变化趋势可引起表面温度场的趋势变化, 进而实现对海冰变化趋势的影响.

相比于前期, 后期 1996—2014 年表面风场的变化趋势明显较弱, 大多数区域的趋势都未通过显著性检验. 其中北冰洋的异常气旋范围缩小, 并移至巴伦支海—喀拉海. 气旋的西侧为巴伦支海区域大范围的异常北风, 气旋的东侧为东北冰洋上空的异常南风. 南风驱动的暖平流有利于东北冰洋表面气温的升高. 然而, 巴伦支海的北风趋势不能解释该区域表面气温的升高. 另一方面, 北太平洋的反气旋式环流在后期也明显减弱. 相比于前期, 鄂霍次克海减弱的南风趋势对应着该区域表面气温增暖趋势的减弱; 而俄罗斯远东到东白令海区域西北风趋势的加强, 有利于白令海表面气温降低趋势的维持. 此外, 圣劳伦斯湾西风趋势也大幅度减弱, 导致该区域温度降低趋势在后期减小. 这些结果表明, 在后期, 大多数区域的大气环流异常仍可通过影响表面温度变化趋势进而影响海冰变化. 同时, 风场趋势在前后 2 个时间段内的差异也可部分地解释各个海域温度趋势在 90 年代中期前后的变化.

## 4 结论与讨论

本文研究了北半球 3 月海冰变化趋势以及趋势在 20 世纪 90 年代中期前后转变的空间分布特征, 并讨论了表面气温和表面风场对 3 月海冰变化趋势的影响. 文中将整个研究时间段 1979—2014 年分为前期(1979—1995 年)和后期(1996—2014 年)2 个子时间段.

1) 北半球 3 月的总海冰范围在前后 2 个时期均显著减少, 且线性趋势相对稳定, 不存在明显的加速现象. 就空间分布而言, 3 月海冰变化趋势主要位于边缘海区域, 包括巴伦支海、白令海、鄂霍次克海和圣劳伦斯湾. 2 个时期内的海冰变化趋势均表现出明显的区域差异. 前期白令海和圣劳伦斯湾的海冰呈趋势性增长, 巴伦支海和鄂霍次克海海冰呈趋势性减少. 后期的海冰密集度变化趋势主要表现为白令海与鄂霍次克海、巴伦支海、圣劳伦斯湾的海冰反向变化. 同时, 海冰变化趋势在 2 个时期间的差异也具有一定的区域性. 其中, 巴伦支海海冰减少的下降速度在前后 2 个时期相对稳定; 白令海海冰增大趋势在 90 年代末以后存在加速现象; 而鄂霍次克海海冰缩减速度在后期减小; 圣劳伦斯湾的海冰范围在 90 年代中期以前显著增大, 后期缓慢缩减. 这些结论说明, 在分析海冰变化趋势时进行分区、分阶段研究的必要性和重要性.

2) 3 月海冰的变化趋势以及趋势本身在 90 年代中期前后差异的产生可能受到表面气温和表面风场趋

势变化的影响. 3 月的气温和海冰范围之间存在显著的负相关关系. 表面风场也可通过引起表面温度场的改变, 进而影响海冰的变化.

海冰和气温之间存在相互作用. 本文指出 3 月表面风场的变化趋势可部分解释表面温度场的变化趋势, 从而在一定程度上揭示了表面气温对海冰的影响. 此外, 本文只关注了温度场和风场对海冰变化的影响, 其他因子诸如海洋过程、海冰自身变化等, 对海冰变化趋势的影响和物理过程仍有待进一步研究.

#### 参考文献:

- [1] SERREZE M C, BARRETT A P, STROEVE J C, et al. The Emergence of Surface-Based Arctic Amplification [J]. *The Cryosphere*, 2009, 3: 11-19.
- [2] SCREEN J A, SIMMONDS I. Increasing Fall-Winter Energy Loss from the Arctic Ocean and Its Role in Arctic Temperature Amplification [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(16): L16797.
- [3] SCREEN J A, SIMMONDS I. The Central Role of Diminishing Sea Ice in Recent Arctic Temperature Amplification [J]. *Nature*, 2010, 464(7293): 1334-1337.
- [4] BENGTTSSON L, SEMENOV V A, JOHANNESSEN O M. The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic-A Possible Mechanism [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(20): 4045-4057.
- [5] SAENKO O A, EBY M, WEAVER A J. The Effect of Sea-Ice Extent in the North Atlantic on the Stability of the Thermohaline Circulation in Global Warming Experiments [J]. *Climate Dynamics*, 2004, 22(6-7): 689-699.
- [6] LEVERMANN A, MIGNOT J, NAWRATH S, et al. The Role of Northern Sea Ice Cover for the Weakening of the Thermohaline Circulation Under Global Warming [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(16): 4160-4171.
- [7] SERREZE M C, HOLLAND M M, STROEVE J. Perspectives on the Arctic's Shrinking Sea-Ice Cover [J]. *Science*, 2007, 315(5818): 1533-1536.
- [8] CAVALIERI D J, PARKINSON C L. Arctic Sea Ice Variability and Trends, 1979-2010 [J]. *The Cryosphere*, 2012, 6: 881-889.
- [9] PARKINSON C L, CAVALIERI D J. Arctic Sea Ice Variability and Trends, 1979-2006 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: C07003.
- [10] COMISO J C, PARKINSON C L, GERSTEN R, et al. Accelerated Decline in the Arctic Sea Ice Cover [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L01703.
- [11] STROEVE J C, KATTSOV V, BARRETT A, et al. Trends in Arctic Sea Ice Extent from CMIP5, CMIP3 and Observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39, L16502.
- [12] 汪代维, 杨修群. 北极海冰变化的时间和空间型 [J]. *气象学报*, 2002, 60(2): 129-138.
- [13] 王冠琳, 刘琳, 于卫东. 白令海和鄂霍次克海的海冰偶极子及其对大气环流的影响 [J]. *海洋科学进展*, 2008, 26(3): 267-276.
- [14] DESER C, TENG H. Evolution of Arctic Sea Ice Concentration Trends and the Role of Atmospheric Circulation Forcing, 1979-2007 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): L02504.
- [15] FRANCIS J A, HUNTER E. New Insight Into the Disappearing Arctic Sea Ice [J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2006, 87(46): 509-511.
- [16] STROEVE J C, SERREZE M C, HOLLAND M M, et al. The Arctic's Rapidly Shrinking Sea Ice Cover: a Research Synthesis [J]. *Climatic Change*, 2012, 110(3-4): 1005-1027.
- [17] SANTER B D, WIGLEY T M L, BOYLE J S, et al. Statistical Significance of Trends and Trend Differences in Layer-Average Atmospheric Temperature Time Series [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(27): 7337-7356.

- [18] DAY J J, HARGREAVES J C, ANNAN J D, et al. Sources of Multi-Decadal Variability in Arctic Sea Ice Extent [J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(3): 034011.
- [19] ZHANG RONG. Mechanisms for Low-Frequency Variability of Summer Arctic Sea Ice Extent [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(15): 4570-4575.

## Regional Features and Factors of the Northern Hemisphere Sea Ice Trends in March

CHEN Zhang<sup>1,2</sup>, WU Ren-guang<sup>3</sup>

1. *School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;*
2. *Key Laboratory of Plateau Atmosphere and Environment of Sichuan Province, Chengdu 610225, China;*
3. *Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

**Abstract:** Based on the data of sea ice concentration and using the sea ice extent (SIE) index, the present study investigates the changes in the Northern Hemisphere sea ice trends in March during 1979-1995 and 1996-2014 and their regional features. The results show that although the negative slope of March SIE over the whole Northern Hemisphere did not experience obvious changes with time, pronounced regional differences were present in the sea ice trend and its change in the mid-1990s. The Barents Sea SIE exhibited a significant downward trend in both periods with a relatively steady rate. The SIE in the Bering Sea showed a positive trend and the slope became steeper after the late 1990s. The Sea of Okhotsk was subjected to ice loss during both periods with a notable increase in between. The SIE in the Gulf of St. Lawrence showed an upward trend during the earlier period and was dominated by inter-annual fluctuations during the later period. The trends and their changes in the mid-1990s of the March sea ice were consistent with those in surface air temperature and atmospheric wind.

**Key words:** sea ice trend; regional difference; surface air temperature change; surface wind change

责任编辑 胡 杨