

# 北极高密集度冰区海冰的多时间尺度变化特征及其极端低值事件分析\*

黄菲<sup>1,2,3</sup>, 孙治宏<sup>1</sup>, 王宏<sup>1,2</sup>

(1.中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室,海洋高等研究院,山东 青岛 266100;

2.青岛海洋科学与技术试点国家实验室,山东 青岛 266237; 3.宁波大学宁波市非线性海洋和大气灾害系统协同创新中心,浙江 宁波 315000)

**摘要:** 利用美国冰雪中心(NSIDC)高分辨率海冰密集度等多种数据,定义了北极高密集度冰区(High concentration ice region: HCIR)海冰变化指数,在此基础上研究了 1989—2017 年 HCIR 海冰多尺度变化特征及其极端低值事件的可能形成原因。结果表明:北极 HCIR 海冰密集度具有显著的单峰型季节变化特征,4 月密集度最高,9 月密集度最低,年较差达 17.70%,兼有夏季融冰期短、冬季结冰期长且持续稳定的特点。HCIR 海冰存在显著的年际年代际变化,在 2007 年发生了年代际转折以后,海冰变化指数的年际变化幅度和频次明显加强,且在 2016、2012、2007、2011、2008 和 2010 年依次出现海冰密集度极端降低事件;2016 年 9 月初 HCIR 海冰密集度达到历史最低值,接近 50%。对 HCIR 海冰密集度极端低值事件的统计研究表明,29 年间共出现 874 天(次)极端低值事件,约占总频次的 8%;空间上海冰密集度的降低主要出现在沿 HCIR 边界线一带,存在巴伦支海-喀拉海北缘的斯瓦尔巴群岛-北地群岛和东西伯利亚-波弗特海两个中心区域,该空间分布与气旋式大气环流引起的北冰洋 Ekman 漂流的辐散分布相一致。这表明 HCIR 海冰密集度的极端降低与极涡的动力作用有关,同时风场对海冰的动力辐散作用还会引起 HCIR 开阔水域的扩大,进一步加强海冰反照率的正反馈机制,使得热力和动力作用耦合起来共同影响 HCIR 海冰的加速融化。

**关键词:** 北极高密集度冰区;海冰密集度;多尺度特征;极端低值事件

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2021)02-001-09

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20200067

引用格式: 黄菲,孙治宏,王宏. 北极高密集度冰区海冰的多时间尺度变化特征及其极端低值事件分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(2): 1-9.

HUANG Fei, SUN Zhi-Hong, WANG Hong. Multi-scale variability of sea ice concentration in the Arctic high concentration ice region and its extremely low events[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(2): 1-9.

在全球变暖的背景下,北极正在发生显著的快速变化。北极变化的核心要素是海冰,北极海冰的变化受到海洋和大气共同的影响。目前学界认为云-辐射反馈、水汽反馈、冰雪反照率反馈等多种作用机制可以引起北极放大,其中冰雪反照率反馈被认为是最主要的影响机制<sup>[1]</sup>。北极海冰减退引起的北极放大效应可以波及到全球气候系统。

当前北极海冰的变化主要体现在北极海冰面积(覆盖范围)和体积的快速下降<sup>[2-3]</sup>。不仅如此,更重要的是,卫星观测资料显示北冰洋多年冰也在持续减退。Comiso<sup>[4]</sup>指出,在 1978—2000 年北极多年冰平均每十年减少 9%,1990 年代以来两年冰的比例则有所上升。2000—2010 年北极多年冰面积减少比总体海冰面积减少得更为显著<sup>[5-6]</sup>,具有多年冰向一年冰转变的趋

势<sup>[7]</sup>。在三月份,多年冰的面积占比从上世纪 80 年代的 75%左右下降到了 45%,并且这种趋势延伸到了北极中央区域<sup>[5]</sup>。另一方面,海冰厚度也在加速变薄<sup>[8-9]</sup>。

北极多年冰不仅对极地气候具有重要影响,并且对环境生态也存在潜在影响<sup>[10]</sup>。周晓<sup>[11]</sup>的研究指出,海冰密集度大于 88%的高密集度海冰范围变化与整个北极海冰范围的变化有很好的-一致性。但当前学界对以多年冰为主的高密集度冰区的海冰变化还缺乏系统的研究。过去北极高纬度地区的海冰以多年冰为主,终年有冰雪覆盖。但是近年来随着北极多年冰覆盖范围的退缩,多年冰厚度的减小,夏季多年冰覆盖区域的海冰密集度频繁出现大幅度下降,融池占比的增加乃至出现大片开阔水域<sup>[1,12]</sup>。近年来已经有相关研究

\* 基金项目:国家重点研究发展计划项目(2019YFA0607004);国家自然科学基金项目(42075024,41906194,41575067)资助  
Supported by the National Key Scientific Research Program of China (2019YFA0607004); the National Natural Science Foundation of China (42075024,41906194,41575067)

收稿日期:2020-03-08;修订日期:2020-05-04

作者简介:黄菲(1971-),女,教授,主要从事气候动力学等方向的研究。E-mail:huangf@ouc.edu.cn

开始关注到夏秋季北极中央区(高密集度冰区)出现的海冰密集度下降的情况。Kawaguchi等<sup>[13]</sup>通过对比多套冰基浮标实测数据以及海冰卫星观测资料,发现2010年8月中下旬北极海冰的消融一度延伸影响到北极中央海域,并且指出长时间维持在北极中央海盆的大气低压系统对海冰的动力强迫和冰上融池的热力效应的共同作用是造成该事件的重要原因。李理等<sup>[14]</sup>通过定义北极中央区低密集度指数(LCCA),研究了2009—2016年期间北极中央区低密集度现象,分析探讨了北极中央区发生低密集度现象时的基本特征和初步成因,但由于研究时段较短,缺乏对中央区海冰的多年总体特征的探究。此外,该研究发现2016年北极中央区海冰融化情况尤为严重,这一结论也得到了相关研究的印证<sup>[15]</sup>。

上述情况反映出近年来整个北冰洋,特别是靠近其中央海盆的高密集度冰区的海冰出现了不同以往的变化特征,而与之相伴的北极冰-海-气耦合关系的变化势必使得整个北极气候系统发生深刻的变化,这对于我们未来研究和预测北极变化提出了新的挑战。进一步关注并分析北极海冰多时间尺度变化特征具有显著的科学意义。此外,由于北极中央区主要是由地理界线划分出的一个固定区域,和高密集度多年冰的覆盖范围并非完全一致,直接将其作为研究的空间范围并非十分科学。而使用北极高密集度冰区(Arctic high concentration ice region, HCIR)的概念,将有利于我们对多年冰海域的密集度变化情况进行更深入的分析研究。

基于此,本文较为系统地研究了1989—2017年北极高密集度冰区海冰的多时间尺度变化特征,并初步对北极高密集度冰区海冰密集度的异常低值事件进行了成因分析。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据介绍

本文使用的逐日海冰密集度数据来自美国冰雪研究中心发布的Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 1数据集(<https://nsidc.org/data/NSIDC-0051/versions/1>)。该数据的空间分辨率为 $25\text{ km} \times 25\text{ km}$ ,从1989年1月1日起开始提供连续的海冰密集度日平均数据。此外还使用了NSIDC提供的海冰冰龄数据,即为Polar Pathfinder Daily 25 km EASE-Grid Sea Ice Motion Vectors, Version 4数据集(<https://nsidc.org/data/NSIDC-0116/versions/4>),该数据集融合了多种卫星微波传感器以及再分析资料提供的数据来源,本研究选用了其月平均的数据。以上两种资料,本

文选取的时段均为1989年1月1日~2017年12月31日。

本文还选取了与研究时段相对应的美国国家环境预报中心(National Centers For Environmental Prediction)以及美国国家大气研究中心(National Center For Atmospheric Research)NCAR/NCEP合作提供的气温,气压日平均再分析资料(<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>)。

### 1.2 方法

本文研究主要使用了平均、方差分析、Mann-Kendall突变检验、合成分析等统计分析方法。

其中Mann-Kendall检验用来诊断HCIR海冰的年代际变化。合成分析主要用于分析HCIR海冰异常低值事件对应的海冰及大气各要素空间场。限于篇幅,对以上统计方法不做赘述。

## 2 北极高密集度冰区海冰变化指数的定义

### 2.1 北极高密集度冰区的确定

为了定量研究北极HCIR的变化特征,首先本文对研究空间范围进行界定。由于HCIR的特性,使其区域覆盖与北极中央区有很大的重叠,而在以往的研究中北极中央区是一个比较模糊的地理区域概念。赵进平等<sup>[12]</sup>将北半球 $85^\circ\text{N}$ 以北区域定义为北极中央区,但由于卫星数据在北极点附近存在较大的空洞盲区, $85^\circ\text{N}$ 以北区域包含了较大的数据盲区,且这个数据盲区对于不同的卫星传感器数据和不同时间段存在较大的变化,这样确定的北极中央区海冰数据质量可能存在一定的问题。也有研究使用某一纬圈(比如 $80^\circ\text{N}$ 或 $84^\circ\text{N}$ )以北区域作为北极中央区,但我们知道北极海冰的分布并不是以北极点为中心沿纬圈对称的(见图1),因此用某一地理上的纬圈以北区域来确定以多年冰为主的北极中央区或者HCIR也并不十分科学。基于以上考虑,本文将1989—2017年多年平均的海冰密集度场中大于90%的等值线所在的空间范围定义为HCIR(见图1(a)中紫色区域)。这样定义的HCIR有明确的物理意义,它不仅是北极地区海冰密集度最高的区域(主要包括北极点周边区域和北美加拿大群岛北部地区),而且该区域包含的海冰大部分为多年冰,即冰龄大于一年以上的冰(见图1(b)),同时这里也是厚冰的聚集区<sup>[16]</sup>。另外,本文确定的HCIR边界可以很好地地区分多年冰和其周边季节性融冰(冬季冻结夏季融化的海冰)的海冰密集度变化,如海冰范围最大的3月和海冰范围最小的9月海冰密集度的差值场(见图1(c)),可以很好地反映北极中央区以外的北极边缘区的季节性融冰特征。

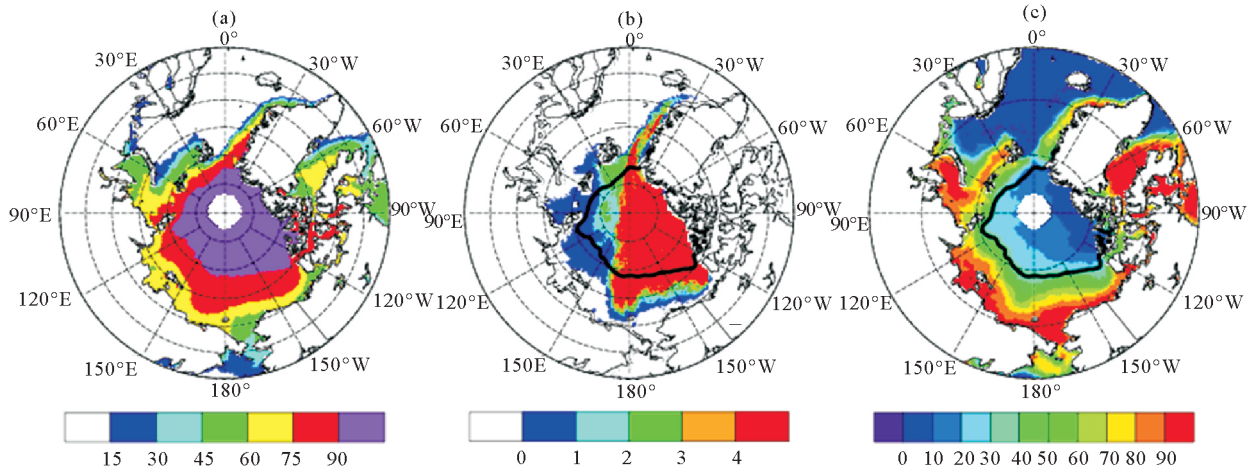


图 1 1989—2017 多年气候平均的北极海冰密集度(a)、冰龄(b)和季节性融冰(3月减去9月)(c)的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of Arctic sea ice concentration (a), ice age (b) and seasonal melting ice (Mar minus Sep) (c) over the 1989—2017 climate mean state

### 2.2 北极高密度冰区海冰变化指数

为了进一步定量表征 HCIR 海冰变化特征,本文采用赵进平等<sup>[12]</sup>提出的海冰密集度变化指数(Averaged sea ice concentration, ASIC),将 HCIR 区域平均的海冰密集度作为该区域的海冰变化指数,即

$$ASIC_{HCIR/ARC}(t) = \frac{1}{S} \iint_S SIC(x, y, t) dx dy。$$

式中: $t$  代表时间点; $x, y$  为区域内各个格点的坐标值; $SIC(x, y, t)$  是特定空间格点上在  $t$  时刻的海冰密集

度值; $S$  为 HCIR 的总面积。该指数可以综合反映 HCIR 海冰密集度的变化特征,是 HCIR 海冰变化的一个良好的量化指标。图 2 即为根据以上指数计算出的 1989—2017 年北极海冰密集度变化指数(ASIC\_ARC)和北极高密度冰区海冰变化指数(ASIC\_HCIR)的时间序列。可以看出二者均存在明显的年循环特征,并且北极 ASIC\_HCIR 总是高于 ASIC\_ARC,体现出 HCIR 密集度高的特征。

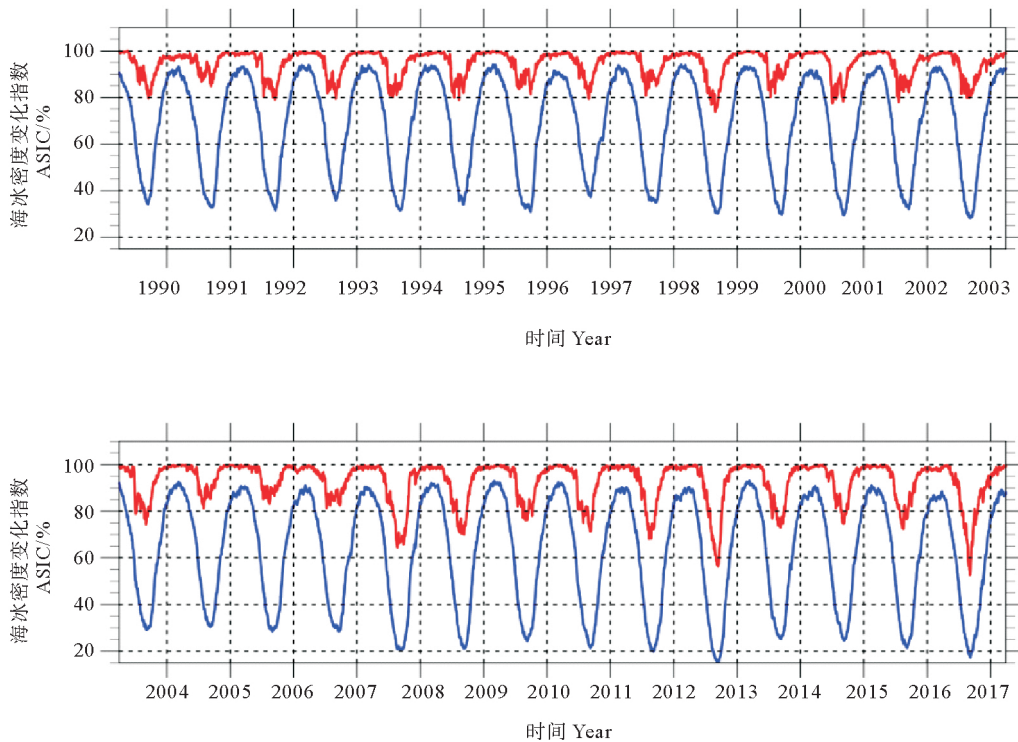


图 2 1989—2017 年北极海冰密集度变化指数(ASIC\_ARC:蓝色)和北极高密度冰区海冰变化指数(ASIC\_HCIR:红色)的时间序列

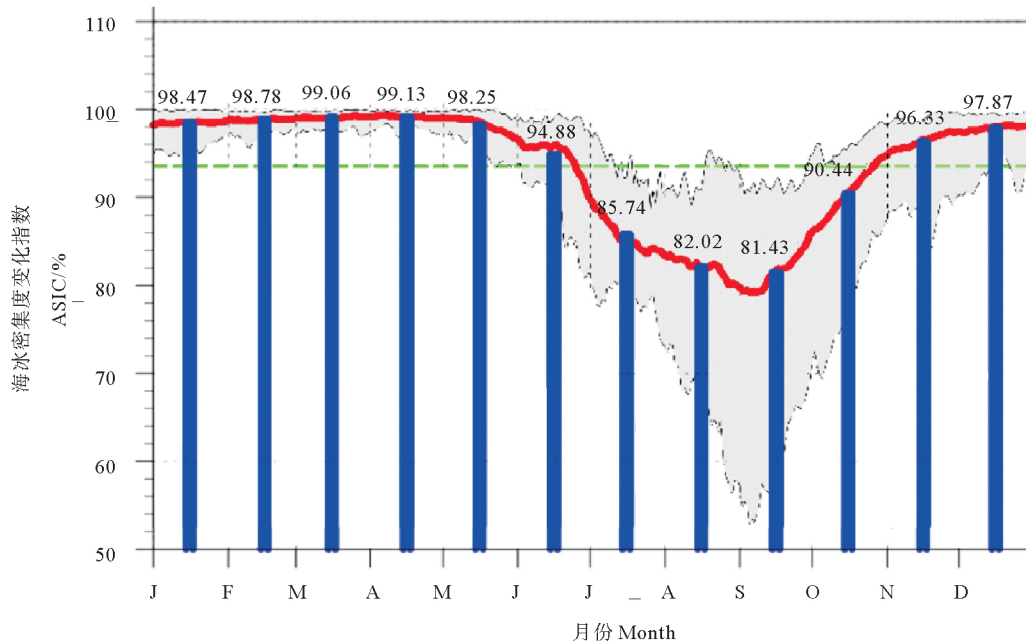
Fig.2 Time series of the Arctic averaged sea ice concentration index (ASIC\_ARC, blue line) and the high concentration ice region sea ice concentration index over high concentration ice region (ASIC\_HCIR, red line) from 1989 to 2017

### 3 北极高密度冰区海冰多尺度变化特征

#### 3.1 季节变化

多年月平均的 HCIR 海冰变化指数(见图 3)表明, ASIC\_HCIR 主要呈现出单峰型的季节变化特征, HCIR 区域年平均海冰密集度为 93.53%, 融冰期一般从 5 月开始, 9 月初海冰密集度最低, 最低值可达到 50%左右, 然后在 10 月进入结冰期, 在次年 4 月初达到一年中的最大值, 最大值超过 99%, 比整个北极地区最大海冰范围出现的 3 月要晚一个月, 4 月份的最大值与 9 月份的最小值之间的海冰密集度的年较差为 17.7%。从 11 月~次年 5 月海冰密集度基本上在 95%以上, 只有 7~9 月 HCIR 平均海冰密集度低于 90%, 表现出夏

季融冰期短冬季结冰期长且持续稳定的特点。一般而言, 融冰过程从 5 月份就开始出现, 但是一般到 6 月份海冰减退过程才稳定建立起来, 并出现明显的密集度降低; 同样的, 在 10 月份 HCIR 区域的海冰开始出现加速冻结过程, 即 6 和 10 月为 HCIR 海冰季节变化的过渡季节, 这与北半球大气环流季节转换的 6 和 10 月突变特征相一致。同时可以发现, 6 月份的融冰过程中海冰在 6 月下旬出现突然加速融化的突变特征。HCIR 海冰密集度的方差也存在类似的单峰型季节变化特征, 7~10 月海冰变化方差最大, 2~4 月方差变化最小, 表明 HCIR 海冰的年际变化主要出现在融冰期的 7~10 月, 其他季节的年际变化振幅相对较小。



(图中柱状代表气候月平均 ASIC\_HCIR 指数, 红色实线代表日平均变化曲线, 灰色阴影区则代表日平均变化的最大最小值变化范围。The bar in the figure represents the monthly average ASIC\_HCIR index of the climate; The solid red line represents the daily mean curve; The gray shaded area represents the maximum and minimum daily variation range.)

图 3 北极高密度冰区海冰变化指数的季节变化特征

Fig.3 Seasonal variation characteristics of ASIC\_HCIR

#### 3.2 年际变化

图 3 中的灰色阴影区变化范围表明, HCIR 的海冰密集度存在显著的年际变化特征, 且年际变化显著发生在融冰季节的夏半年 6~10 月, 冬半年的年际振荡不强。从图 2 每年的年循环变化可以发现, 每年夏季 ASIC\_HCIR 的极小值具有显著的年际变化, 海冰密集度最小值出现在 2016 年的 9 月初, 接近 50%, 其他海冰密集度最小值较低的年份依次出现在 2012、2007、2011、2008 和 2010 年。据统计, 多年平均的 ASIC\_HCIR 最低值为 80%左右, 夏季低于 80%的多年平均天数为 23 d, 而在 2007、2008、2010、2011、2012 和 2016

年的夏季, ASIC\_HCIR 低于 80%的天数分别为 65、58、50、60、72 和 73 d, 远高于其多年平均值。另外从这些年 ASIC\_HCIR 的日平均年循环变化曲线(见图 4(a))可以发现, HCIR 极端降低事件更多地发生在秋季的结冰期, 表明海冰在秋季冻结时间延后比春季融化时间提前贡献更大。值得注意的是, 对于整个北极地区, 海冰范围最小值出现在 2012 年夏季, 海冰密集度变化指数(ASIC\_ARC)最小值也出现在 2012 年夏季, 2016 年次之, 而 HCIR 海冰变化指数(ASIC\_HCIR)的最小值则出现在 2016 年, 2012 年次之(见图 2), 这可能暗示了 2012 年北极海冰的融化更多地发生在北冰洋边缘区

域,而 2016 年海冰的融化则更主要发生在 HCIR, HCIR 区域和边缘区海冰融化的机制也可能不同,值得

进一步探索。

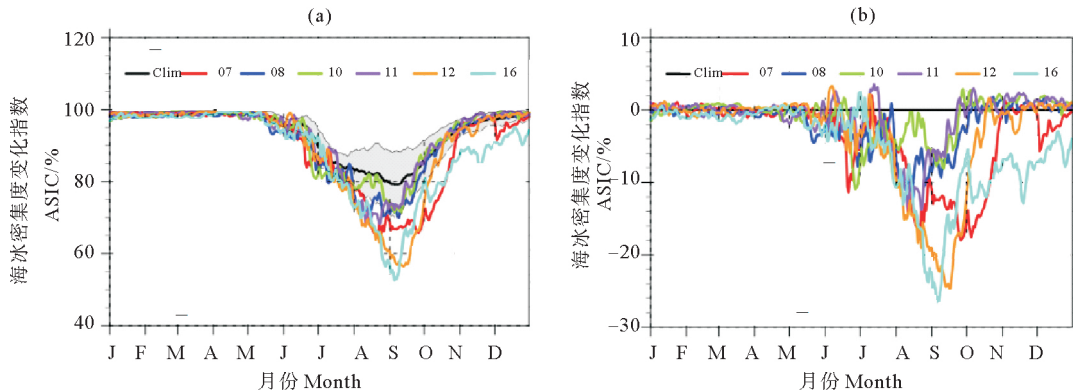


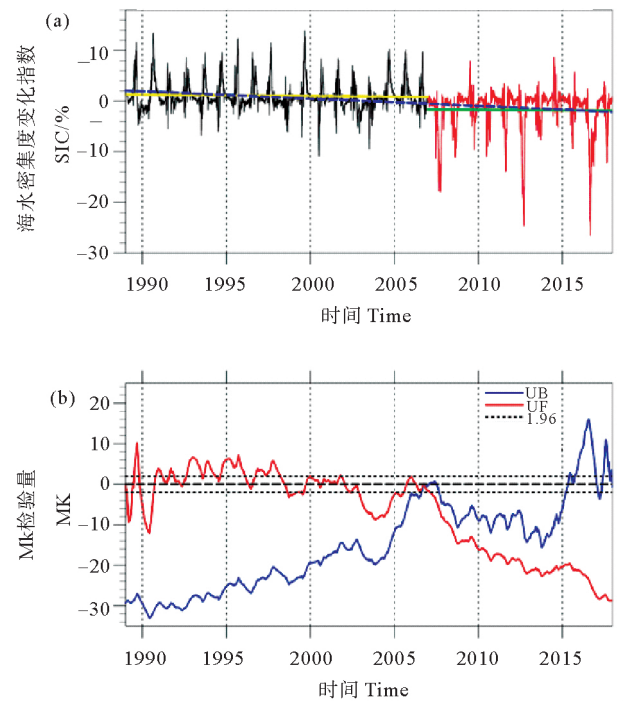
图 4 北极高密度冰区海冰密集度典型极端低值年份(a)ASIC\_HCIR 及其(b)距平值分布  
Fig.4 ASIC\_HCIR(a) and its anomalies(b) in extremely low sea ice concentration years in the HCIR

ASIC\_HCIR 的距平序列(见图 5(a))更清楚地反映了 HCIR 海冰密集度的这种年际变化特征,同时可以注意到 HCIR 海冰密集度的大幅度减小主要从 2007 年开始,几乎每一年都发生夏季海冰密集度的快速减小,意味着夏季 HCIR 海冰的加速融化。2010 年夏季北极中央区海冰的密集度出现的极端低值曾引起了科学家的关注<sup>[12,17]</sup>,而最近发生在 2016 年夏季延伸至北极中央区的海冰大范围融化更应该引起我们的关注<sup>[15]</sup>,其对极端天气气候的影响值得深入研究。

### 3.3 年代际变化

图 5(a)不仅反映了 HCIR 海冰密集度变化的年际变化特征,还反映出 2007 年前后 HCIR 海冰出现了一次非常明显的年代际转型特征,ASIC\_HCIR 距平序列从正值平衡态转为负值平衡态,这与整个北极海冰范围的年代际转型特征相一致<sup>[18]</sup>。在 1989—2006 年阶段,HCIR 海冰的变化总体比较平稳,以年际振荡为主,ASIC\_HCIR 的平均距平值以小的正值为主;而在 2007 年以后,HCIR 的海冰融化明显加快,ASIC\_HCIR 距平序列围绕着负值平衡态做年际振荡,且年际振荡的振幅几乎是前一个阶段的两倍。M-K 突变检验(见图 5(b))的结果也证实了 HCIR 海冰在 2007 年前后发生了显著的年代际突变,并且通过了 95% 信度水平的检验,这种年代际转型可能由于 2007 年北极多年冰的大量损失<sup>[5]</sup>,从而可能导致北极出现气候变化的临界点(Tipping point)<sup>[19]</sup>,海冰变化进入到一个新的平衡态。

进一步对突变前后的 ASIC\_HCIR 指数(见图 5(a))的变化趋势分别进行分析,可以发现,HCIR 的变化在 2007 年的年代际突变点前后出现了显著变化,1989—2017 年整体的下降趋势是  $-1.44\%/10 a$ ,两个阶段内各自的变化趋势却较弱,均表现为微弱的下降趋势,



(a)中黑色:1989—2006 年,红色:2007—2017 年。图中蓝色虚线是 1989—2017 年的线性趋势线,黄色为 1989—2006 年线性趋势线,绿色为 2007—2017 年线性趋势线。(a) black: 1989—2006; Red: 2007—2017; Blue dotted line: linear trend for 1989—2017; Yellow line: linear trend for 1989—2006; Green line: linear trend for 2007—2017.)

图 5 1989—2017 年北极高密度冰区海冰变化指数的逐日距平序列(a)和 (b)ASIC\_HCIR 指数的 M~K 突变检验

Fig.5 (a) The daily anomaly time series of ASIC\_HCIR and (b) Mann-Kendall test of the ASIC\_HCIR index from 1989 to 2017

其线性倾向系数分别为  $-0.25\%/10 a$  和  $-0.18\%/10 a$ ,并通过了 95% 信度水平的检验。其中 1989—2006 年阶段,HCIR 海冰密集度维持在相对高位,其年平均密

集度为 94.60%，而在 2007 年以后，海冰密集度出现了系统性下降，年平均密集度跌至 92.80%。ASIC\_HCIR 下降的趋势也存在明显的季节变化特征，海冰减少最严重季节当属夏季(6~9月)，下降趋势达到了-3.49%/10 a。同时，ASIC\_HCIR 指数在两个阶段的标准差分别为 2.74%和 4.30%，即 ASIC\_HCIR 的际振幅变化在 2007 年以后有显著增加，超过了前一个阶段的 1.5 倍以上。

对比整个北极海区海冰范围的年代际变化特征<sup>[18]</sup>可以发现，HCIR 海冰出现加速融化的时间要晚于整个北极特别是北冰洋边缘海区季节性融冰的变化，并且 HCIR 海冰的变化是突变式的，而季节性融冰的变化则更多地反映了线性趋势的变化上<sup>[20]</sup>，这可能一定程度上暗示了 HCIR 多年冰的快速融化机制与传统的海冰反照率正反馈机制有所不同。

#### 4 北极高密度冰区海冰密集度极端低值事件分析

##### 4.1 北极高密度冰区海冰密集度极端低值事件的统计特征

前面的结果表明，HCIR 海冰密集在有些年的夏季可能达到极端低值，比如 2016 年夏季海冰密集度最低值接近 50%，意味着 HCIR 也会出现较大范围的开阔水域，进而通过海冰反照率正反馈机制使得海冰加速融化。本文发现 HCIR 海冰出现快速融化现象主要发生在 2007 年以来的近 10 年中，从这几个典型年 HCIR 海冰密集度的日平均曲线(见图 4(a))及其距平曲线(见图 4(b))的变化可以发现，2016 和 2012 年都在 9 月份出现了海冰密集度低于 60%的极端降低过程，相对于气候平均值，这两年的海冰密集度减小了 20%以上，减小 10%以上的年份依次为 2016、2012、2007、2011、2008 和 2010 年，这种海冰密集度极端降低过程在夏季有时能持续一两个月。值得注意的是 2016 年的 11 和 12 月还出现了两次海冰密集度极端降低过程，使得 2016 年的秋冬季节 HCIR 海冰密集度出现历史新低。

为了更好地研究 HCIR 海冰加速融化过程的主要特征，本文根据 ASIC\_HCIR 指数定义 HCIR 海冰密集度极端低值事件，即当某一天 ASIC\_HCIR 指数低于其 1.5 倍标准差的值即视为一次极端低值事件。据此标准本文统计出 1989—2017 年这 29 年间共出现 HCIR 海冰密集度极端低值事件 874 天(次)，约占时间序列总天数的 8%左右。可以看出基于该阈值挑选出的极端低值事件主要反映了概率密度分布 90%分位以外的 ASIC\_HCIR 低值(见图 6)，也就是代表了大约 10%的极端小概率事件。这种极端低值事件在四个季节均有分布，但是夏季的极端低值事件最多。2007 年以后，其

发生频次和强度显著增加。

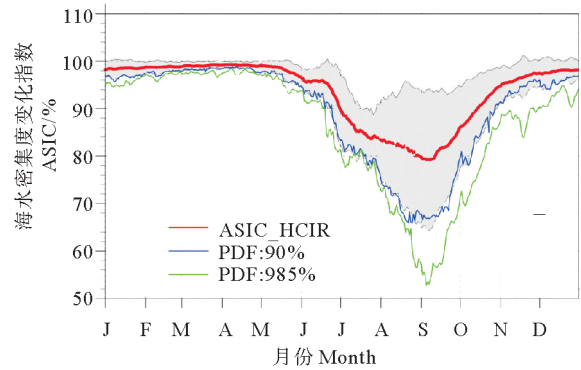


图 6 1989—2017 年北极高密度冰区海冰变化指数的年循环 1.5 倍标准差(阴影)及其 90%/95% 概率密度分布阈值

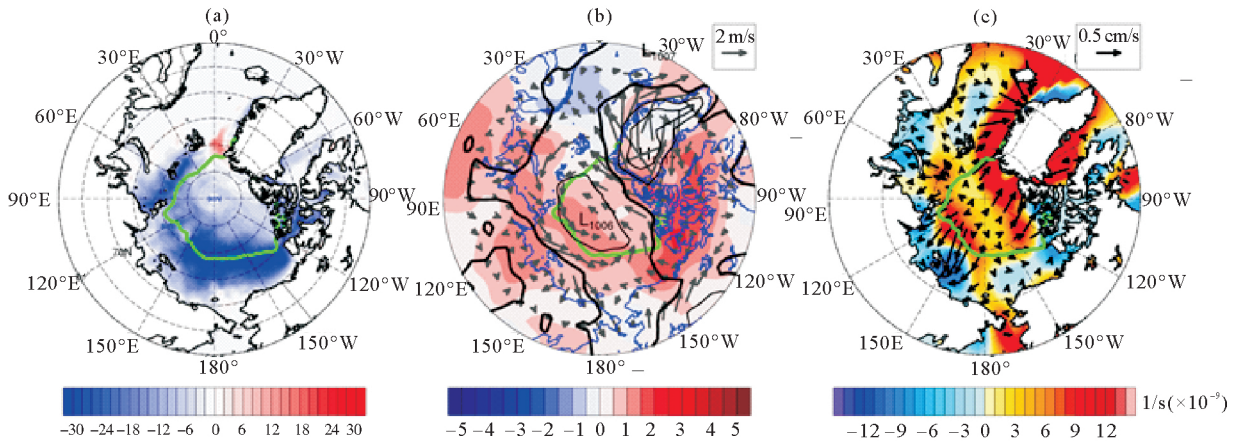
Fig.6 1.5 times standard deviation series and probability density distribution 90%/95% percentile value of ASIC\_HCIR from 1989 to 2017

##### 4.2 北极高密度冰区海冰密集度极端降低的可能原因

为了初步探讨 HCIR 海冰密集度极端降低的可能原因，本文对 HCIR 海冰极端低值事件对应的海冰密集度空间分布和大气环流要素进行了合成分析。由于 HCIR 海冰密集度极端降低事件最主要发生在 7~9 月的夏季，这里只对发生在夏季的极端低值事件进行分析。

从合成的北极海冰密集度异常场(见图 7(a))可以发现，当 HCIR 海冰密集度极端低值发生时，几乎整个北冰洋都表现为海冰密集度减少的特征，也就是除格陵兰东北角海域外北极海冰几乎都出现快速融化过程，沿 HCIR 边缘线一带均受到外围海冰退缩融化的影响，受影响面积占比达 40%以上。海冰融化最显著的有两个区域，第一个区域位于巴伦支海-喀拉海北缘的斯瓦尔巴群岛-北地群岛一带，第二个区域则涵盖从东西伯利亚海到波弗特海的大片海区，其中心海冰密集度异常值可以达到-30%以上。而靠近加拿大北极群岛以及格陵兰岛一侧的多年冰区域海冰密集度的变化则相对较小，这和北极海冰的分布情况以及极地环流状态有关。对比图 1(b)中的海冰冰龄分布，可以看出这一区域的海冰冰龄多在 4 年及以上，处于相对稳定状态。

形成海冰密集度降低的主要因素有热力因素和动力因素。其中热力因素主要为局地气温异常增加和热平流导致的热量输送，而动力因素则主要为大气风场对海冰的外强迫作用<sup>[14]</sup>。



((a) 海冰密集度距平场; (b) 表面 2 m 气温距平场(填色等值线)、海平面气压场(黑色等值线)和 850 hPa 风场(矢量); (c) 风生 Ekman 漂流(矢量)及其对应的散度场(填色等值线), 其中图(a)~(c)中的绿色实线均代表北极高密度冰区的范围边界。(a) Sea ice concentration anomaly; (b) Air temperature at 2 m (shaded), SLP (black contours) and windfield at 850 hPa (vectors); (c) Wind-induced Ekman drift (vectors) and its corresponding divergence field (shaded).)

图 7 基于北极高密度冰区海冰密集度极端低值事件的夏季(7~9月)合成场

Fig.7 Composite fields based on extremely low ASIC\_HCIR events in summer (July~September)

从近海面 2 m 气温场上看(见图 7(b)), 北极地区除北欧海外以正异常为主。在欧亚大陆北部, 从巴伦支海-喀拉海-拉普捷夫海, 一直延伸到 HCIR, 都是显著的气温暖异常。在北美大陆一侧, 暖异常更为强烈, 其中心位于加拿大北部群岛, 偏暖幅度达到  $2^{\circ}\text{C}$  左右, 体现了北极放大的空间分布特征。

海平面气压场上主要表现为几乎占据整个北极的低压系统, 其中心气压约 1 000 hPa 左右(见图 7(b))。在极涡的作用下, 北冰洋低空出现环绕高密度冰区的气旋式风场, 并且在北冰洋沿岸区域形成了强盛的风带, 其中风力最强的区域位于加拿大北部群岛和格陵兰岛一侧, 此外在楚科奇海以及波弗特海区域存在显著风切变。夏季北冰洋上空在这种气旋式环流的驱动下, 上层海洋受正的风应力旋度的影响, 进一步会产生上层海洋 Ekman 漂流的辐散作用。图 7(c)为根据理论公式<sup>[21]</sup>计算的由海表面风应力作用下产生的上层海洋垂向平均 Ekman 漂流及其散度分布场。可以发现, HCIR 海域均存在较为显著的向外辐散的 Ekman 漂流, 不考虑计算误差较大的多年冰覆盖区域, Ekman 漂流的辐散区域主要沿着 HCIR 边界线分布, 与海冰密集度的极小值区域(见图 7(a))有较好的一致性。在这样的辐散型流场作用下, HCIR 的边缘区域海冰向外输运, 使得海冰密集度降低, 出现较多的开阔水域。这表明, 近年来发生在 HCIR 特别是其边缘区域海冰密集度的极端低值事件, 不仅受北冰洋边缘海区由于海冰反照率正反馈机制的北极放大作用的影响, 还受到加强的气旋式大气环流引起北冰洋 Ekman 漂流的向外辐散, 进而导致 HCIR 海冰密集度降低的动

力作用影响。同时风场对海冰的动力辐散作用还会进一步加强海冰反照率的正反馈机制, 使得热力和动力作用耦合起来共同影响 HCIR 海冰的加速融化。

## 5 结论

本文利用美国冰雪数据中心的北极海冰密集度数据分析了 1989—2017 年北极高密度冰区(HCIR)海冰密集度多尺度时间变化特征及其极端低值事件。主要结论如下:

(1) 本文将 1989—2017 年多年平均的海冰密集度场中大于 90% 的等值线包含的空间范围定义为北极高密度冰区, 该区域位于北极中央海盆, 并且更靠近加拿大北群岛以及格陵兰岛, 主要以多年冰、厚冰为主。并进一步定义了 HCIR 的海冰变化指数, 系统分析了该区域海冰的多尺度变化特征。结果表明, HCIR 海冰变化以单峰型年循环为主要特征, 海冰密集度最大值出现在 4 月, 最小值出现在 9 月, 融冰期较短, 主要出现在 6~9 月; HCIR 海冰存在显著的年际年代际变化, 在 2007 年发生了年代际转折以后, 海冰变化指数的年际变化幅度和频次明显加强, 且在 2016、2012、2007、2011、2008 和 2010 年依次出现海冰密集度极端降低事件。2016 年 9 月初 HCIR 平均海冰密集度达到单日历史最低值, 并且当年 11、12 月的结冰期, 还出现了两次创纪录的极端低密集度事件过程, 这是历史上前所未有的, 值得进一步的重视与研究。

(2) 本文采用某一天 ASIC\_HCIR 指数低于其气候平均态 1.5 倍标准差的阈值为一次极端低值事件, 据此标准统计出 1989—2017 年这 29 年间共出现 HCIR 海冰密

集度极端低值事件 874 天(次), 约占时间序列总天数的 8% 左右; 空间上海冰的极端融化主要出现在沿 HCIR 边界线一带的区域, 存在巴伦支海-喀拉海北缘的斯瓦尔巴群岛-北地群岛和东西伯利亚-波弗特海两个中心区域。探究了 HCIR 海冰密集度极端低值事件发生的可能原因, 热力上受整个北极地区近地表大气异常增暖的北极放大的正反馈影响, 动力上则在 HCIR 上空显著的极涡和气旋式风场作用下, 拉普捷夫海-波弗特海以及波弗特海与 HCIR 的过渡区域, 其上层海洋存在显著的辐散型垂向平均 Ekman 漂流, 从而导致 HCIR 边缘区域海冰的向外输运, 海冰密集度减小, 开阔水域扩大, 同时耦合海冰反照率正反馈的热力作用, 进而加速了海冰的融化。

#### 参考文献:

- [1] 赵进平, 史久新, 王召民, 等. 北极海冰减退引起的北极放大机理与全球气候效应[J]. 地球科学进展, 2015, 30(9): 985-995.  
Zhao J P, Shi J X, Wang Z M, et al. Arctic amplification produced by sea ice retreat and its global climate effects[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(9): 985-995.
- [2] Maslanik J, Fowler C, Stroeve J, et al. A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(24): L24501.
- [3] Kwok R, Cunningham G F, Wensnahan M, et al. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003-2008[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114: C07005.
- [4] Comiso J C. A rapidly declining perennial sea ice cover in the Arctic[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(20): 1956doi: 10.1029/2002GL015650.
- [5] 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): L13502.
- [6] Comiso J C. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover[J]. Journal of Climate, 2012, 25(4): 1176-1193.
- [7] Holland M M, Stroeve J. Changing seasonal sea ice predictor relationships in a changing Arctic climate[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(18): L18501.
- [8] Rothrock D A, Yu Y, Maykut G A. Thinning of the Arctic sea-ice cover[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(23): 3469-3472.
- [9] Holloway G, Sou T. Has Arctic Sea ice rapidly thinned[J]. Journal of Climate, 2002, 15(13): 1691-1701.
- [10] Bjorgo E, Johannessen O M, Miles M W. Analysis of merged SSMR-SSM/I time series of Arctic and Antarctic sea ice parameters 1978-1995[J]. Geophysical Research Letters, 1997, 24(4): 413-416.
- [11] 周晓. 北极海冰快速变化及大气优势模态的响应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.  
Zhou X. Rapid Change of the Arctic Sea Ice and Response of Dominant Modes of the Atmosphere[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [12] Zhao J P, Barber D, Zhang S G, et al. Record low sea-ice concentration in the central Arctic during summer 2010[J]. Advances Atmospheric Sciences, 2018, 35(1): 106-115.
- [13] Kawaguchi Y, Hutchings J K, Kikuchi T, et al. Anomalous sea-ice reduction in the Eurasian basin of the Arctic Ocean during summer 2010[J]. Polar Science, 2012, 6: 39-53.
- [14] 李理, 苏洁, 魏立新, 等. 北极中央区海冰低密集度现象研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(11): 33-45.  
Li C, Su J, Wei L X, et al. Exploration of anomalous low sea ice concentration phenomenon in the Central Arctic[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(11): 33-45.
- [15] Petty A A, Stroeve J C, Holland P R, et al. The arctic sea ice cover of 2016: a year of record-low highs and higher than expected lows[J]. The Cryosphere Discussions, 2017, 12(2): 433-452.
- [16] Laxon S W, Giles K A, Ridout A L. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(4): 732-737.
- [17] 隋翠娟, 张占海, 凌铁军, 等. 2010 年夏季北极冰情变化及大气环流场演变[J]. 极地研究, 2011, 23(3): 205-216.  
Sui C J, Zhang Z H, Ling T J, et al. Status of Arctic sea ice and atmospheric circulation in summer 2010[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2011, 23(3): 205-216.
- [18] 王宏, 周晓, 黄菲. 大气环流优势模态对北极海冰变化的响应 I. 北极涛动[J]. 海洋学报, 2015, 37(11): 57-67.  
Wang H, Zhou X, Huang F. Response of dominant mode for atmospheric circulation in northern hemisphere to the accelerated decline of Arctic sea ice: I. the Arctic Oscillation[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(11): 57-67.
- [19] Tietsche S, Notz D, Jungclauss J H, et al. Recovery mechanisms of Arctic summer sea ice[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(2): L02707.
- [20] 牛璐, 黄菲, 周晓. 北极海冰的年代际转型与中国冻雨年代际变化的关系[J]. 海洋学报, 2015, 37(11): 105-117.  
Niu L, Huang F, Zhou X. Decadal regime shift of Arctic sea ice and associated decadal variability of Chinese freezing rain[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(11): 105-117.
- [21] Ma B, Steele M, Lee C M. Ekman circulation in the Arctic Ocean: Beyond the Beaufort Gyre[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(4): 3358-3374.



## Multi-Scale Variability of Sea Ice Concentration in the Arctic High Concentration Ice Region and Its Extremely Low Events

HUANG Fei<sup>1,2,3</sup>, SUN Zhi-Hong<sup>1</sup>, WANG Hong<sup>1,2</sup>

(1. The Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Institute of Advanced Ocean Study, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. Ningbo Collaborative Innovation Center of Nonlinear Hazard System of Ocean and Atmosphere, Ningbo University, Ningbo 315000, China)

**Abstract:** Based the National Snow and Ice Data Center high-resolution sea ice concentration (SIC) and other data, we defined an averaged sea ice concentration index in the high concentration ice region (ASIC\_HCIR), and studied the multi-scale variabilities of sea ice in the high concentration ice region (HCIR) from 1989 to 2017. Extremely low event of SIC (ELES) in HCIR and its possible causes were investigated as well. The results show that the ASIC\_HCIR has a significant unimodal seasonal variation, with the maximum in April and the minimum in September. Annual range of the seasonal cycle for ASIC\_HCIR is about 17.70%. It also has a short summer melting period and a long and stable winter icing period. ASIC\_HCIR also has significant interannual and interdecadal variabilities. After the decadal shift in 2007, both amplitude and frequency of the ASIC\_HCIR interannual variability significantly strengthened. ELES in HCIR occurred in turn in 2016, 2012, 2007, 2011, 2008 and 2010, respectively. The lowest SIC appeared at the beginning of September 2016, reaching a record low SIC close to 50%. Statistics on ELES in HCIR indicated that 874 days (times) of ELES, accounting for about 8%, occurred in the 29 years from 1989 to 2017. For ELES, the decrease of SIC mainly occurred in the marginal zone along the boundary of the high concentration ice region, with two main areas: the Barents sea-Svalbard Archipelago-Severnaya Zemlya zone and the eastern Siberian Sea-Beaufort Sea region. This spatial distribution is consistent with the divergence field of upper ocean Ekman drifting caused by a cyclonic atmospheric circulation, which suggested that the ELES in HCIR was related to the dynamics of polar vortex. The dynamic divergence of wind field on sea ice would also cause wider open waters in HCIR, further strengthen the positive albedo feedback. The feedback enabled thermal and dynamic coupling, and then accelerated the sea ice melting in the HCIR.

**Key words:** high concentration ice region; sea ice concentration; multi-scale variability; extremely low event

责任编辑 庞 旻