

李程, 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, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.11.004

Li Cheng, Su Jie, Wei Lixin, et al. Exploration of anomalous low sea ice concentration phenomenon in the Central Arctic[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(11):33-45, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.11.004

北极中央区海冰低密集度现象研究

李程^{1,2}, 苏洁^{1*}, 魏立新², 梁红杰¹, 黄菲¹, 赵进平¹

(1.中国海洋大学 物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2.国家海洋环境预报中心 国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081)

摘要: 近年, 北极中央密集冰区出现海冰低密集度的异常现象。为了探讨这一现象的成因, 本文使用 ERA-Interim 再分析资料, 定义了北极中央区海冰低密集度(LCCA)指数, 研究了 2009—2016 年的 6—9 月北极中央区发生的海冰低密集度现象。分析表明, 研究时段内在北极中央区发生了 6 次明显的海冰低密集度(LCCA 峰值)过程。在这些过程中, 局地气温异常并不是导致海冰低密集度现象发生最主要的因素; 海冰低密集度区域的形态及冰速场分布均与大气环流场相对应; 在 LCCA 指数峰值发生前均有气旋中心出现在北冰洋 70°N 以北并伴随向北移动, 气旋引起海冰辐散, 同时所携带的较低纬度的热量导致海冰迅速融化。在 6 次过程中, 有 3 次为气旋影响配合北极偶极子(DA)型环流。LCCA 指数与 84°N 平均向北温度平流和北极中央区海冰速度散度呈正相关。在 LCCA 指数峰值前, 温度平流对海冰低密集度区域形成的影响大于海冰辐散的影响。

关键词: 北极海冰低密集度现象; 北极中央区; 海冰密集度; 气旋

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2018)11-0033-13

1 引言

21 世纪以来, 在北极海冰面积(特别是夏季)减小趋势更加显著背景下, 2007 年和 2012 年夏季的两次最低值^[1-2]历史记录引起了科学界广泛的关注。研究显示, 2007 年海冰异常与北极地区 8 月和 9 月的月平均大气环流的偶极子(Dipole Anomaly, DA)异常有关^[3-4], 而发生在北极地区的气旋活动是导致 2012 年海冰面积达到极小值的主要原因^[2]。

以往不少研究将北极夏季海冰面积的年际变化

与北极涛动(Arctic Oscillation, AO)等大尺度大气环流建立联系^[5-6], 在年代际尺度上, 以冬季变化为主的 AO 的确对 20 世纪 80 年代末的夏季海冰剧烈减少有密切关系^[7], 而在年际尺度上 AO 与北极夏季海冰面积的相关性在 1997 年之后就比较弱了, 人们称之为“退耦”现象^[8]。

也有一些研究将 9 月北极海冰的面积与气旋活动建立联系。统计结果表明, 近年来, 风暴轴向北移动, 从中纬度进入北极地区的气旋数目增加^[9-10]。北极区域气旋发生的数量、气旋中心的低压强度和气旋带来的热量输送均对 9 月北极海冰面积有影响^[11]。

收稿日期: 2017-10-20; 修订日期: 2018-05-10。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC1402705); 全球变化研究国家重大科学研究计划(2015CB953901); 国家自然科学基金委员会重点基金项目(41330960)。

作者简介: 李程(1992—), 男, 广东省茂名市人, 主要从事极区气旋对海冰的影响研究。E-mail: licheng9@foxmail.com

* 通信作者: 苏洁, 女, 教授, 主要从事海冰变化、遥感及数值模拟研究。E-mail: sujie@ouc.edu.cn

通过对 Fram 海峡气旋个例的研究发现,气旋活动对海冰运动存在明显的外力强迫作用^[12-13]。冰速会随气旋数目和强度的增加而增加^[14],而冰速场的变化会引起海冰密集度分布的变化。

在北极海冰面积剧烈变化的同时,夏季北极海冰的分布形态也出现了异常变化。夏季北极海冰面积出现极小值的 2007 年和 2012 年,其海冰融化区域有所不同,2007 年主要体现为楚科奇海和东西伯利亚海区的海冰退缩;而 2012 年主要体现为波弗特海区的海冰退缩^[2]。近年还有一个新的现象是,夏季北极中央区也不再像以往一样总是整个被密集的海冰覆盖。根据中国第四次北极考察观测的结果,2010 年 8 月在北极中央区出现了海冰密集度异常现象^[15-17],即北极中央密集冰区出现低密集度区域的异常情况。根据美国冰雪数据中心(NSIDC)的报道,2013 年 8 月在北极中央区也出现了这一现象。随着北极变暖,这一现象的发生可能会增加,由此改变以往北极中央区海气交换的状态,对其现象的分析及成因的探索对于进一步理解北极海冰快速变化及北极气-冰-海耦合系统气候变化有重要意义。

本文利用日平均海冰密集度数据确定研究指数,对北极中央区海冰密集度异常现象进行了统计,并且分析了大气因子对这种海冰低密集度的影响。

2 资料来源

本文所使用的资料来自欧洲中期数值预报中心(ECMWF)提供的 ERA-Interim 再分析资料,包括日平均海冰密集度、海平面气压、气温和表面风场,时间长度为 2009—2016 年,均为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 的全球格点。

本文所使用的冰速数据为 Polar Pathfinder Daily 25 km EASE-Grid Sea Ice Motion Vectors, Version 3, 来自美国冰雪数据中心(NSIDC),时间长度为 2009—2015 年,时间分辨率为日平均,空间分辨率约 25 km,主要通过 AVHRR、微波(如 SMMR、SSM/I、SSMIS 和 AMSR-E)、NCEP/NCAR 风场、浮标等数据合成。由于 NSIDC 提供的该套冰速数据截止到 2015 年,因此下文中未对 2016 年冰速进行分析。

由于 ERA-Interim 海冰密集度资料在 2009 年之前北极中央区的数据空洞较大^[18],因此本文所选取的时段为 2009—2016 年。为了揭示海冰异常变化的原因,本文还使用 ERA-Interim 每 6 小时一次的海平面气压对气旋活动进行了统计。

3 北极中央区海冰低密集度指数定义及统计

本文利用日平均海冰密集度量定义北极中央区夏季海冰的低密集度指数。根据刘成龙和赵进平^[19]的研究,密集冰区应当为海冰密集度大于 89% 的区域,夏季北极密集冰区的南界大致在 85°N 左右。本文定义 $84^\circ\sim 90^\circ\text{N}$ 的区域为北极中央区,基本可以完全包含密集冰区。当北极中央区出现了密集度明显低于 89% 的情况,我们认为是一种北极中央区海冰密集度分布的异常,为了便于量化这种异常情况,本文建立了一个北极中央区海冰低密集度(Low Concentration in Central Arctic, LCCA)指数:

$$LCCA(a) = \sum_{m=1}^n \varphi_{i,m} (c_{i,m} < a), \quad (1)$$

式中, $c_{i,m}$ 为各格点的海冰密集度; a 为给定的密集度阈值; $\varphi_{i,m}$ 为面积加权参数。LCCA(a) 表示北极中央区海冰密集度小于某一阈值 a 并大于 15% 的格点面积占北极中央区总面积的比例,用来表征北极中央区海冰融化的程度。

通常取海冰密集度 75% 作为冰间湖的研究参数^[20]。因此,本文首先选取阈值为 75% 的海冰低密集度指数 LCCA(75%),通过 LCCA(75%) 来初步统计北极中央区海冰低密集度现象在一年的每个月中发生的频率。

图 1 为 2009—2016 年各年逐月北极中央区海冰出现低密集度区域的天数。这里只考虑有一定空间

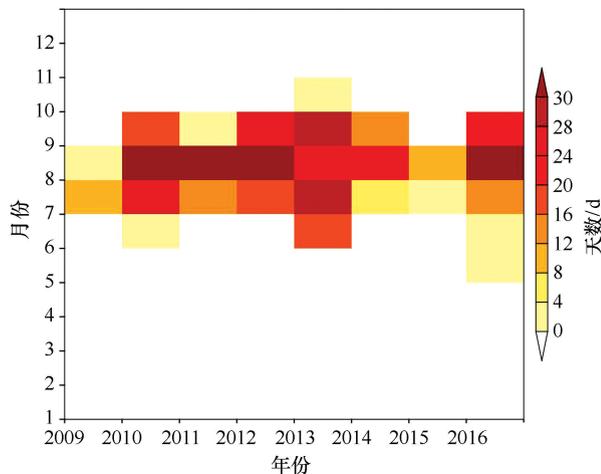


图 1 2009—2016 年各月海冰低密集度指数 LCCA(75%) 大于 5% 的天数统计

Fig.1 Number of days when LCCA(75%) index is greater than 5% in each month from 2009 to 2016

范围的低密集度区, 统计各月 LCCA(75%) 大于 5% (海冰密集度小于 75% 的格点面积与北极中央区总面积比例大于 5%) 的情况所发生的天数。由图可见, 出现天数较多的主要集中于夏季 6—9 月, 其中最为突出的是 8 月份。因此本文只选取夏季 6—9 月计

算 LCCA 指数。

为了考察 LCCA 指数密集度阈值的合理性, 我们也选取海冰密集度 50% 为阈值, 计算了 2009—2016 年 6—9 月的 LCCA(50%) 指数, 两种指数的变化曲线见图 2。

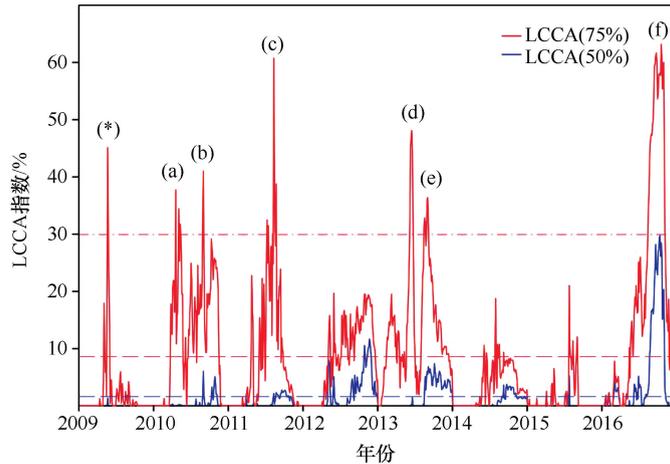


图 2 2009—2016 年 6—9 月海冰低密集度指数 LCCA(75%) (红色实线) 和 LCCA(50%) (蓝色实线)

Fig.2 Index of LCCA(75%, red solid; 50%, blue solid) in June to September from 2009 to 2016

(*) (a) (b) (c) (d) (e) (f) 为海冰低密集度指数的峰值; 红色/蓝色虚线为大于 LCCA(75%)/LCCA(50%) 的平均值, 红色点划线为大于 LCCA(75%) 平均值 1.5 个标准差的值

(*) (a) (b) (c) (d) (e) (f) and (g) represent maximum of LCCA index. The dash line denotes the value one and a half times standard deviation greater than average. The blue dotted line denotes the value one and a half times standard deviation greater than the average of LCCA (50%).

Red dotted line denotes the average value of LCCA(75%)

从图 2 中的 LCCA(75%) 指数曲线可以看出, 研究时段出现了 7 次 LCCA(75%) 指数峰值超过 26% (平均值 1.5 个标准差) 的过程, 即北极中央区出现了面积超过 26% 的区域中的海冰密集度均小于 75% 的现象。通过与美国冰雪中心 NT2 算法 (NASA TEAM 2) 等其他几种遥感产品及中等分辨率的 MODIS (The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 图像的比对, 确定 2009 年 7 月 18 日 (*) 的高 LCCA 值为同化模式输入数据的问题, 非真实低密集度现象。因此本文只针对 6 次高 LCCA 值过程进行研究。这 6 次海冰低密集度过程的峰值出现时间分别为 2010 年 7 月 7 日 (a), 2010 年 8 月 21 日 (b), 2011 年 8 月 14 日 (c), 2013 年 7 月 27 日 (d), 2013 年 8 月 20 日 (e), 2016 年 9 月 5 日 (f)。而发生在 2011 年 8 月和 2016 年 9 月的海冰低密集度现象过程中, 海冰低密集度指数峰值达到了 50% 以上。

LCCA(50%) 指数值较 LCCA(75%) 明显偏低 (图 2), 其中最显著的低密集度现象出现在 2016 年 9 月, 其次是 2012 年 9 月, 峰值均大于平均值 1.5 个标

准差。值得注意的是, 2012 年 9 月虽然 LCCA(50%) 指数值较高, 但是 LCCA(75%) 指数值却没有明显偏高。由密集度数据 (图略) 可见, 2012 年 9 月北极海冰密集区范围较小, 北极海冰面积达到极小值。同时, LCCA(50%) 指数在 2010 年和 2013 年 7 月和 8 月均未出现高值时段, 不符合中国第四次北极考察的观测结果和 NSIDC 的报道。可见, 相比而言, LCCA(75%) 对刻画北极中央区海冰低密集度现象更为合理, LCCA(50%) 则更容易受到北极夏季整体海冰面积异常的影响。因此, 本文选取 LCCA(75%) 进行研究, 后文简称 LCCA。

4 北极中央区海冰低密集度现象的表现形态

通过统计, 2009—2016 年 6—9 月的 LCCA 指数中大于平均值 1.5 个标准差的有 66 d (表 1)。这几次海冰低密集度过程 LCCA 指数大于平均值 1.5 个标准差的天数有增加的趋势, 2010 年 7—9 月 LCCA 指

数大于平均值 1.5 个标准差的天数有 12 d, 而 2016 年 8—9 月则有长达 29 d LCCA 指数大于平均值 1.5 个

标准差。本文选取 6 个 LCCA 峰值对应的北极中央区低海冰密集度过程进行分析。

表 1 2009—2016 年 6—9 月海冰低密集度现象统计

Tab.1 Statistics of Arctic sea ice low concentration in June to September from 2009 to 2016

中央区海冰低密集度时段	超过低密集度指数平均值 1.5 个标准差的天数	该次过程中低密集度指数最大值出现日期
2010 年 7 月 7 日, 2010 年 7 月 11—12 日, 2010 年 7 月 14—16 日	6	2010 年 7 月 7 日
2010 年 8 月 20—22 日, 2010 年 9 月 3—5 日	6	2010 年 8 月 21 日
2011 年 8 月 3 日, 2011 年 8 月 5 日, 2011 年 8 月 9—10 日, 2011 年 8 月 12 日, 2011 年 8 月 14—18 日	10	2011 年 8 月 14 日
2013 年 7 月 23—28 日	6	2013 年 7 月 26 日
2013 年 8 月 15—23 日	9	2013 年 8 月 21 日
2016 年 8 月 14 日至 9 月 11 日	29	2016 年 9 月 5 日

图 3 给出了 6 个 LCCA 指数峰值当日的海冰密集度分布。北极中央区海冰出现低密集度现象时, 海冰低密集度区域更多出现在大西洋扇区一侧, 根据其表现形态主要可以分为 3 类。其中 2010 年 8 月(图 3b)、2013 年 8 月(图 3e)和 2016 年 9 月(图 3f) LCCA (75%) 的峰值对应着海冰低密集度区域大致沿 60°E

~170°W 经线呈现明显的带状分布; 2010 年 7 月(图 3a)和 2013 年 7 月(图 3d), 中央区内的海冰低密集度区域集中在大西洋扇区基本沿纬向分布; 而 2011 年 8 月(图 3c), 整个北极中央区的海冰密集度都较低, 主要体现为整体性的消融, 海冰密集度分布的空间差异不明显。

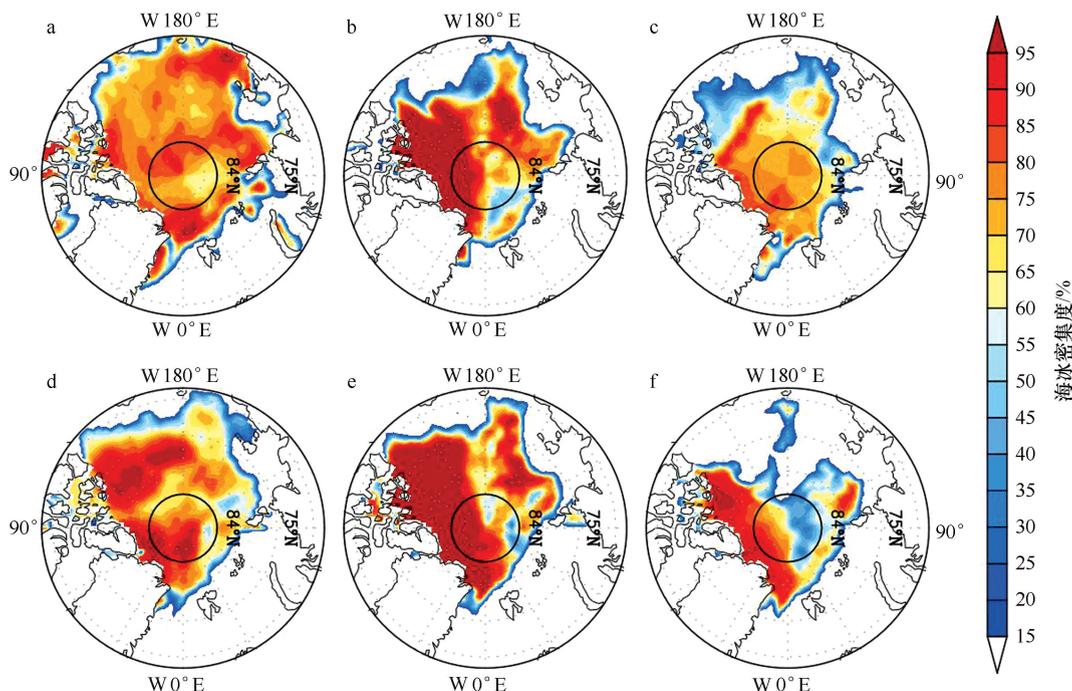


图 3 2009—2016 年 6—9 月 6 次低密集度过程中 LCCA 指数峰值当日的海冰密集度分布

Fig.3 Sea ice concentration distribution in the date of 6 peaks of LCCA index during June and September from 2009 to 2016

a. July 7, 2010; b. August 21, 2010; c. August 14, 2011; d. July 26, 2013; e. August 21, 2013; f. September 5, 2016; inner black circle denotes 84°N

5 北极海冰低密集度现象的成因

海冰形成低密集度区域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力强迫作用。北极气旋活动在向高纬度输送热量导致海冰融化的同时,带来的强风也会影响北极海冰的漂移场,从而改变密集度的分布。针对北极中央区海冰低密集度现象,我们分别从局地气温、大气环流与表面风场、海冰漂移场、北极气旋活动几个方面进行分析研究。

5.1 局地气温

图 4 给出了北极中央区的局地平均气温和局地平均气温距平。由图可见,LCCA 指数与局地气温对

应关系并不明显。只有 2011 年 8 月和 2016 年 9 月两次 LCCA 值较大时伴随有较高的气温距平。由图 3 可知,2011 年 8 月的海冰低密集度过程基本表现为大面积融化,而 2016 年出现了北极海冰面积的极小值记录。因此,局地增温应该是这两次海冰低密集度过程的成因之一。然而,其余 4 次的情况则不同,当 LCCA 值较大时,北极中央区并没有出现明显的高温现象,其中 2010 年 7 月和 2013 年 8 月北极中央区平均气温甚至出现负距平;另外,还存在这样的情况,当 LCCA 指数较小时,北极中央区气温距平反而高于平均值,例如 2015 年 7 月和 8 月。由此可见,局地气温不是导致海冰低密集度现象的最主要的因素,也不是影响 6—9 月所有北极中央区海冰低密集度过程的关键因素。

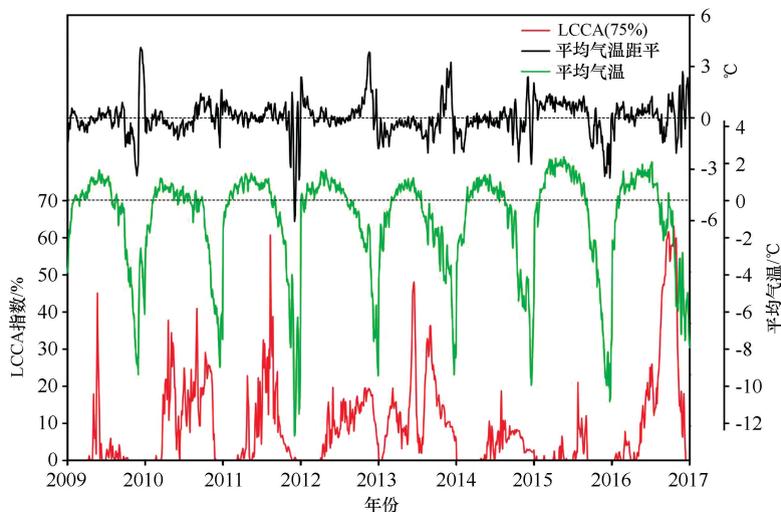


图 4 2009—2016 年 6—9 月海冰低密集度指数(红色实线,单位:%),北极中央区平均气温(绿色实线,单位:°C),北极中央区平均气温距平(黑色实线,单位:°C),0°C 线(黑色虚线)

Fig.4 LCCA index (red solid), average air temperature in Central Arctic (green solid, unit:°C), anomalies of average air temperature in Central Arctic (black solid, unit:°C), 0°C line (black dot) during June and September from 2009 to 2016

5.2 大气环流与表面风场

海平面气压可以表征低层大气环流的基本结构^[21]。这里我们选取 2009—2016 年 6—9 月 LCCA 指数这 6 次出现峰值的当日及其前 6 日,分别进行北极海平面气压场和表面风场的合成(图 5)。

由图 5 可见,在 LCCA 达到峰值及其前 6 天,大气环流形势基本可以初步解释低密集度区域的空间分布特征。

其中在 2010 年 8 月、2013 年 8 月和 2016 年 9 月

的 3 次海冰低密集度过程中,北极基本表现为大气环流 DA 特征,中央低密集度区基本位于高压系统和低压系统之间、气压梯度较大的区域,风向从太平洋扇区指向大西洋扇区(或从大西洋扇区指向太平洋扇区),其中 2010 年 8 月的过程虽然气旋并没有大面积侵入中央区域,但高低压间梯度较大;而在 2010 年 7 月和 2013 年 7 月,北极中央区受到低压系统影响,虽然低压中心位置有所不同,但局地风向基本沿纬向从北美大陆方向指向欧亚大陆方向;2011 年 8 月低压中

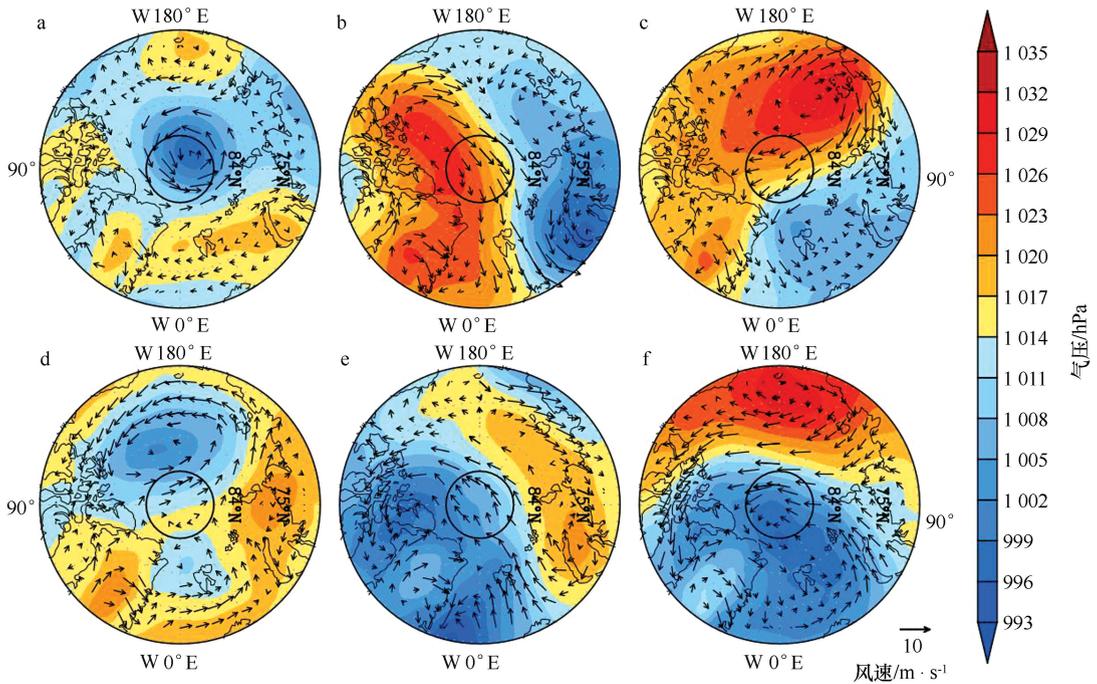


图5 2009—2016年6—9月6次北极中央区海冰低密集度指数峰值当日及其前6日的平均海平面气压场(单位:hPa)和平均表面风场(单位:m/s)

Fig.5 Sea level pressure field (unit: hPa) and surface wind field (unit: m/s) averaged over the peak of LCCA index and 6 days ahead during June and September from 2009 to 2016

a.2010年7月7日;b.2010年8月21日;c.2011年8月14日;d.2013年7月26日;e.2013年8月21日;f.2016年9月5日;内部黑色圈为84°N

a.July 7, 2010; b.August 21, 2010; c.August 14, 2011; d.July 26, 2013; e.August 21, 2013; f.September 5, 2016; inner black circle denotes 84°N

心位于冰岛附近,但强度偏弱,北极中央区受到较强的高压系统影响。

因此,大气环流是海冰低密集度区域分布的影响因素。同时,我们也注意到6次低密集度现象发生在北极地区均存在低压系统(气旋)的活动(图6中的粉色轨迹)。

5.3 海冰漂移场

大气环流,特别是海面风场通过影响海冰冰速场进一步影响了海冰密集度的分布。这里我们分别选取2009—2015年6—9月5次LCCA指数出现峰值的当日及其前6日,进行北极海冰密集度和海冰漂移场的合成分析(图6)。

由图6可见,LCCA指数峰值前的海冰冰速和大气环流基本一致,海冰密集度较低的区域基本对应着冰速场发生辐散的区域。其中2010年8月的海冰漂移场表现为较强的北极穿极流;2010年7月和2013年7月的海冰漂移场则表现为明显的气旋式环流,虽然运动中心位置不同,但都与当时的大气环流气旋中

心相吻合;2011年8月的海冰漂移场在太平洋扇区表现为反气旋式运动,在大西洋扇区表现为气旋式运动,也与大气环流形势一致;值得注意的是,2013年8月LCCA指数峰值前一周的冰速场比较反常,受大气高、低压位置的影响,呈现出与穿极流反向的海冰运输。

5.4 北极气旋活动

气旋活动对北极海冰有明显的影响。通过对Fram海峡气旋个例的研究发现,海冰融化与气旋带来的热量有关^[12-13]。而通过对北冰洋区域气旋的研究则指出,夏季7月和8月是北冰洋区域气旋最活跃的月份,并且北冰洋区域气旋的数目和气旋中心低压强度与9月北极海冰面积有关^[11,21]。为了研究气旋活动对这6次低密集过程的影响,我们利用海平面气压数据,根据Serreze和Barrett^[21]的方法,统计了70°N以北、存在时间超过5d、向北移动的气旋中心位置和气压强度,同时也利用气温和风速资料计算了北极中央区外围78°~84°N的平均经向大气热量输

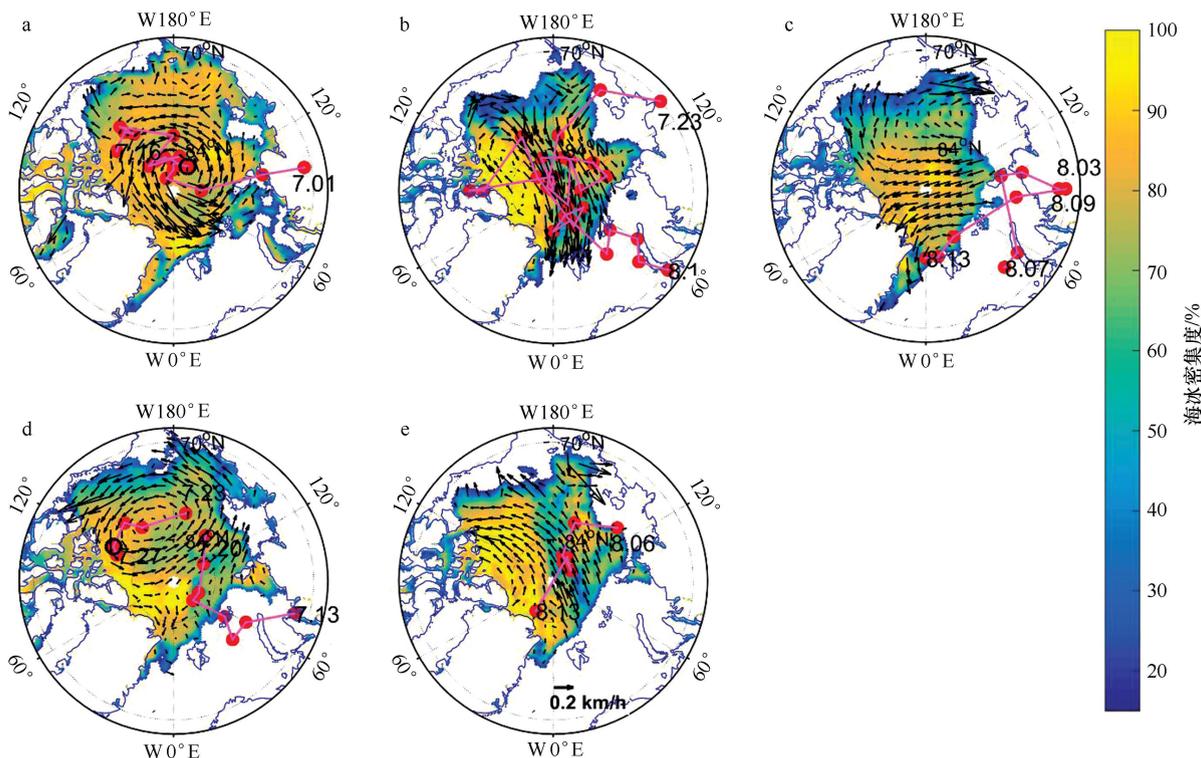


图6 2009—2015年6—9月5次北极中央区海冰低密集度指数峰值当日及其前6日的平均海冰密集度(单位:%)和冰速(单位:km/h)

Fig.6 Sea ice concentration (unit: %) and ice motion (unit: km/h) of 7 days average from 6 days before to LCCA peak day during June and September from 2009 to 2015

a.2010年7月7日;b.2010年8月21日;c.2011年8月14日;d.2013年7月26日;e.2013年8月21日;粉色实线为LCCA指数峰值当日70°N以北、存在时间超过5d的逐日气旋路径,红点表示每日的气旋位置,黑色圆圈代表对应LCCA指数峰值的气旋位置,并且每段气旋发展到消亡的具体日期已标注在图上

a.July 7, 2010; b.August 21, 2010; c.August 14, 2011; d.July 26, 2013; e.August 21, 2013.Pink solid line denotes the daily trajectories of cyclones that north of 70°N and longer than 5 days. Red solid point is the everyday position of cyclone, black solid point is the peak day of LCCA. The date means the day cyclone arise and decline

送(图7)。

通过统计北极地区气旋中心的位置和强度,发现多数情况下,当气旋中心位于北极70°N,甚至到达80°N以北时,LCCA指数也会随之上升。同时气旋的强度也对LCCA指数存在影响,以2013年和2016年最为明显。在气旋位置所在纬度达到最北或者中心低压强度达到最大(气压最低值)后1~5d,LCCA指数也达到峰值;在这6次过程中,气旋都具有向北移动的趋势。由图7还可看出,纬向平均意义下,LCCA指数峰值发生前,在北极中央区外围向北的经向热量输送也会出现大值,可见,来源不同的气旋,都能够将相对较低纬度的热量携带输送到北极中央区,导致局部海冰异常融化。

由图7可见,强的经向热量输送有时对应着

LCCA指数的增大,出现峰值,如2010年8月中下旬和2013年8月中旬等,这些时段基本上配合了气旋位置偏北、强度偏强的情况;但有时则不会引起LCCA指数变化,如2013年8月下旬,这些时段气旋中心位置没有出现在70°N以北。这说明气旋活动是影响LCCA指数的主要因素之一,气旋活动通过平流热输送影响北极中央区海冰的融化,并配合大尺度的环流对海冰漂移产生影响,导致海冰低密集度区域的出现。

5.5 进一步分析

为了进一步研究LCCA与热力因素和动力因素的关系,我们计算了LCCA指数与84°N平均向北温度平流和北极中央区海冰速度散度的相关系数(图8)。

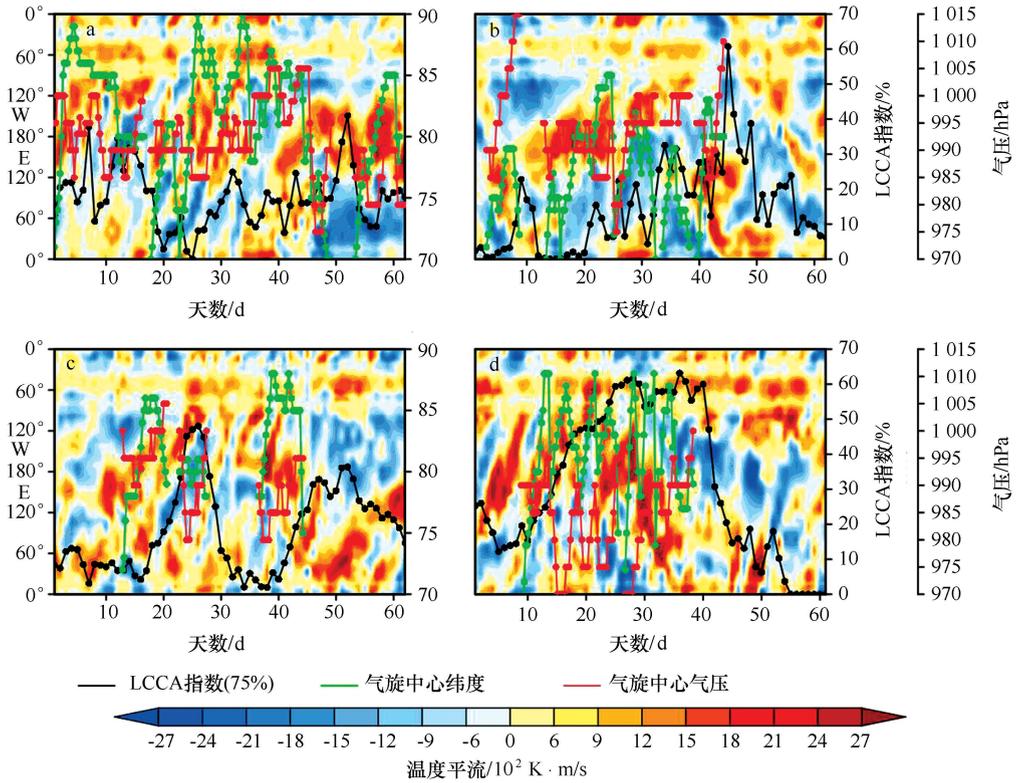


图7 2010年7—8月(a)、2011年7—8月(b)、2013年7—8月(c)、2016年8—9月(d)的 $78^{\circ}\sim 84^{\circ}\text{N}$ 的平均经向热量输送(填色图,单位: $10^2\text{K}\cdot\text{m/s}$),北极中央区海冰低密集度指数(黑色实线,单位:%),气旋中心所在纬度(绿色实线),气旋中心的低压强度(红色实线,单位:hPa);横坐标为天数

Fig.7 Meridional heat transport averaged from 78°N to 84°N (shadow, unit: $10^2\text{K}\cdot\text{m/s}$), LCCA index (black solid), latitudes (green solid) and pressures (red solid, unit: hPa) of cyclone centers during July and August in 2010(a), 2011(b), 2013(c) and 2016 (d). Abscissa denotes the day number from a to d July 1st to August 31st, August 1st to September 30th (e)

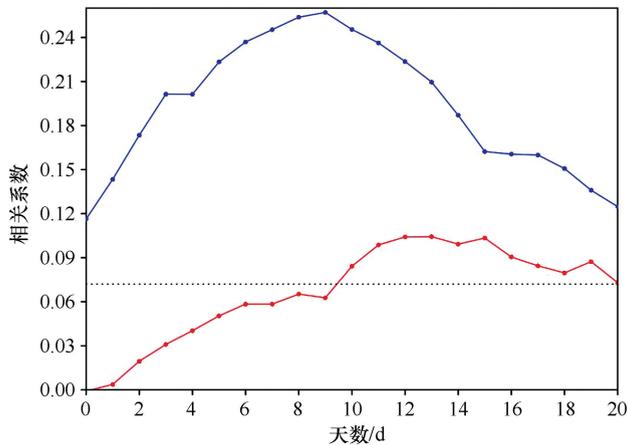


图8 LCCA指数与 84°N 平均向北温度平流(蓝色实线)和北极中央区平均海冰散度(红色实线)同期至超前20 d 相关系数,黑色虚线为置信度99.5%的临界值

Fig.8 The correlation between average heat transportation of 84°N and LCCA index (blue line), the correlation between average ice divergence in Central Arctic and LCCA index (red line) and 99.5% confidence interval (black dot)

由图8可见,LCCA指数与 84°N 平均向北温度平流和北极中央区平均海冰速度散度的相关系数整体呈正相关,即 84°N 平均向北温度输送为正值或海冰辐散时,LCCA指数较大。这也与前文5.3节和5.4节关于北极中央区海冰低密集度现象的分析较一致。LCCA指数与 84°N 平均向北温度平流的相关系数在超前20 d内均通过了99%的可信度检验,而LCCA指数与北极中央区平均海冰散度的相关系数在超前20~10 d内通过了99%的可信度检验。在超前9 d时,LCCA指数和温度平流的相关系数达到最大值;在超前12 d时,LCCA指数和海冰速度散度的相关系数达到最大值。在超前20 d内,LCCA指数与 84°N 平均向北温度平流的相关系数大于LCCA指数与北极中央区海冰速度散度的相关系数,可见纬向平均意义下在海冰低密集度过程中温度平流的影响要大于海冰辐散的影响。

由于研究时段内北极中央区低密集度峰值次数较少,进行统计分析的代表性不足,这里我们进一步对每次低密集度过程进行分析,试图寻找其中一致性的成分。

图9和图10分别为6次LCCA指数峰值前8日、6日、4日、2日和当日的海平面气压、风场和海冰密集度,可以反映LCCA峰值前的大气环流和海冰变化过程。由图7和图10可以看出,LCCA指数峰值前均有气旋中心在 70°N 以北出现的情况,且气旋均来自欧亚大陆一侧。气旋活动会影响北极地区的大气环流形势,由图9b、e、f可以看出,2010年8月、2013年8月和2016年9月受到气旋活动影响,在LCCA指数峰值当日大气环流均表现为北极DA型。同时由图10b、e、f可知,尽管北极海冰的面积大小不同,但是这3次过程中北极海冰出现了相似的海冰低密集度区域的形态。由图9a、d可以看出,2010年7月和2013年7月的LCCA指数峰值过程中,气旋进入北极地区后,持续停留在北极较高纬度的地区,北极主要受到低压控制,没有表现出DA型大气环流形式,海冰呈现分散状开裂,开裂的形态与位置也不相同。而根据图9c,2011年8月气旋短暂地经过较高纬度,但中心没有达到 80°N 以北,北极主要受到高压控制;这时LCCA指数的高值仅代表北极中央区出现海冰大面积的整体融化,并非在高密集度区域出现明显的低密集度现象,同时结合图7b和图10c基本可以判断,2011年8月这次LCCA峰值应该是从海冰边缘开始的整体融化过程。

总之,在6次LCCA指数峰值前,LCCA指数与 84°N 平均向北温度平流和海冰辐散呈正相关,并且温度平流的影响要大于海冰辐散的影响。同时,在LCCA指数峰值前均有气旋出现在北极 70°N 以北的区域。尽管气旋的来源和路径不尽相同,但是当气旋连续几天盘旋在北极中央区会造成较长时间的较高LCCA指数值,却不一定达到LCCA指数最高值,因为低密集度区可能偏离中央区中心而出现在周边海域。6次过程中有3次在气旋活动后形成了DA的环流型,表示气旋活动配合DA型环流形势比较容易造成北极中央区LCCA指数高值出现;当气旋移动到中央区附近时携带了相对低纬度的热量,有利于低密集度现象的维持和加强。因此气旋中心进入北极中央区配合DA大气环流型有利于LCCA指数出现峰值。

6 结论与讨论

北极中央区的海冰低密集度现象是近几年北极海冰分布的新特点。本文利用ERA-Interim再分析资料,统计研究了2009—2016年6—9月发生在北极中央区的海冰低密集度过程,并对其成因进行了初步探讨,主要结论如下:

(1)定义了北极中央区海冰低密集度指数,在2009—2016年6—9月,北极中央区共发生6次强度较大的海冰低密集度过程,LCCA指数峰值分别出现在2010年7月7日,2010年8月21日,2011年8月14日,2013年7月27日,2013年8月20日和2016年9月5日。

(2)LCCA指数峰值当日的海冰低密集度区域更多发生在大西洋扇区,而局地气温并不是影响北极中央区海冰低密集度现象的主要因素。大气环流表面风场驱动下海冰速度场的分布是影响海冰低密集度现象的动力因素,海冰低密集度区域的空间分布与指数峰值当日及之前一周左右的大气环流及海冰冰速场相吻合。

(3)北极海冰低密集度现象发生前在北极 70°N 以北区域存在气旋活动。尽管气旋的来源和路径不尽相同,但是气旋的向北移动和持续停留会带来热量,导致LCCA指数增加。6次LCCA峰值中有3次为北极DA型环流,气旋活动配合DA型环流更容易造成LCCA指数出现峰值。

(4)LCCA指数与 84°N 平均向北温度平流和北极中央区海冰速度散度呈正相关,向北温度平流或海

冰辐散程度越强, LCCA 指数越大。在 LCCA 峰值前, 温度平流对海冰低密集度区域形成的影响要大于

海冰辐散的影响。

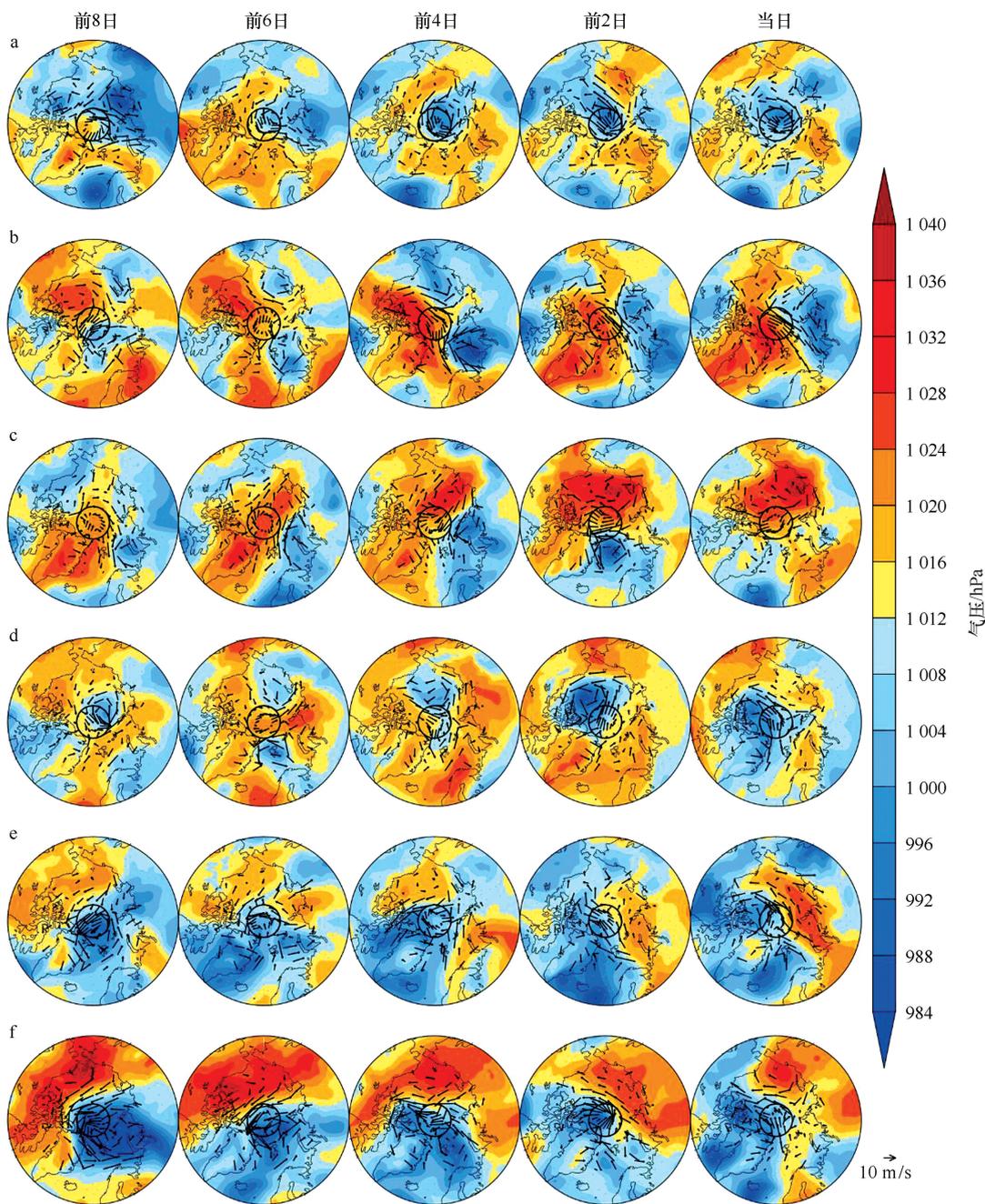


图9 2009—2016年6—9月6次北极中央区海冰低密集度指数峰值前8日、6日、4日、2日和当日的海平面气压和表面风场

Fig.9 Sea level pressure and surface wind field in the 6 peak days of LCCA index and 2, 4, 6, 8 days ahead during June to September from 2009 to 2016

a.2010年7月7日;b.2010年8月21日;c.2011年8月14日;d.2013年7月26日;e.2013年8月21日;f.2016年9月5日;
内部黑色圈为84°N

a.July 7, 2010; b.August 21, 2010; c.August 14, 2011; d.July 26, 2013; e.August 21, 2013; f.September 5, 2016; inner black circle denotes 84°N

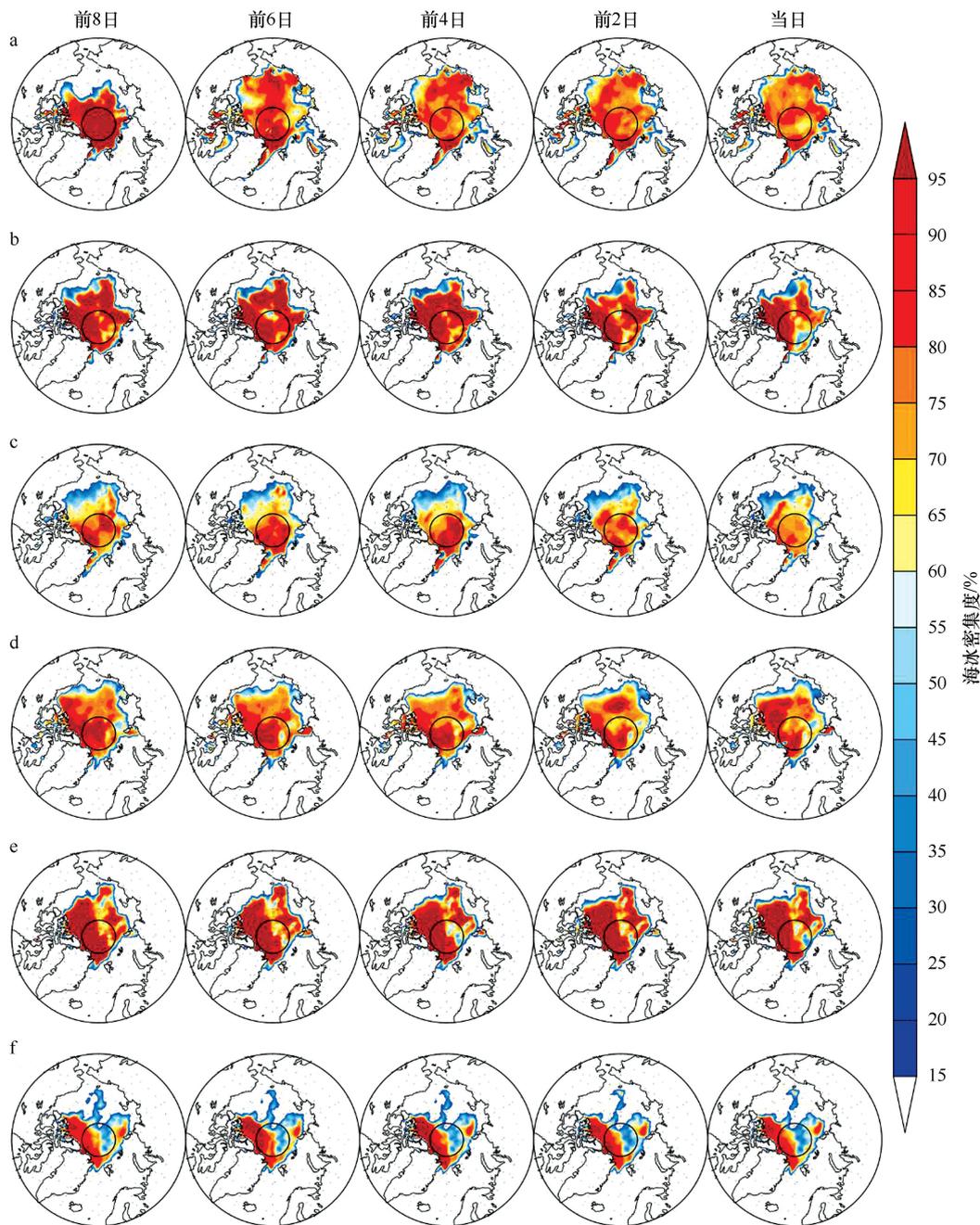


图 10 2009—2016 年 6—9 月 6 次北极中央区海冰低密集度指数峰值前 8 日、6 日、4 日、2 日和当日的海冰密集度

Fig.10 Sea ice concentration in the 6 peak days of LCCA index and 2, 4, 6, 8 days ahead during June to September from 2009 to 2016

a.2010 年 7 月 7 日;b.2010 年 8 月 21 日;c.2011 年 8 月 14 日;d.2013 年 7 月 26 日;e.2013 年 8 月 21 日;f.2016 年 9 月 5 日;内部黑色圈为 84°N

a.July 7, 2010; b.August 21, 2010; c.August 14, 2011; d.July 26, 2013; e.August 21, 2013; f.September 5, 2016; inner black circle denotes 84°N

北极中央区海冰低密集度现象是在全球变暖和北极海冰面积逐年减少的背景下, 北极中央区发生的

海冰密集度异常现象。本文提出的 LCCA 指数的峰值可以很好地体现北极中央区海冰的低密集度现象,

该指数是对整体海冰面积等海冰参数的一个补充。本文初步地解释了有关低密集度现象的各种表现及紧密相关的因素。但由于个例有限,这一现象与气旋等大气因子之间的定量统计关系尚不确定,另外,海

洋过程对这一现象是否有贡献及有多大贡献也不清晰,具体的海—气—冰耦合物理过程还需要利用模式进行进一步研究。

参考文献:

- [1] Stroeve J, Serreze M, Drobot S, et al. Arctic Sea Ice Extent Plummet in 2007[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2008, 89(2): 13–14.
- [2] 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.
- [3] Wang Jia, Zhang Jinlun, Watanabe E, et al. Is the Dipole Anomaly a major driver to record lows in Arctic summer sea ice extent[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(5): L05706.
- [4] Zhang Jinlun, 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): L11505.
- [5] 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.
- [6] Ogil M, Rigor I G. Trends in Arctic sea ice and the role of atmospheric circulation[J]. *Atmospheric Science Letters*, 2013, 14(2): 97–101.
- [7] Wei Jianfen, Su Jie. Mechanism of an abrupt decrease in sea-ice cover in the Pacific sector of the Arctic during the late 1980s[J]. *Atmosphere-Ocean*, 2014, 52(5): 434–445.
- [8] Su Jie, Wei Jianfen, Li Xiang, 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 21st International Offshore and Polar Engineering Conference. Maui, Hawaii, USA: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011: 962–967.
- [9] Zhang Xiangdong, Walsh J E, Zhang Jing, et al. Climatology and interannual variability of Arctic cyclone activity: 1948–2002[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(12): 2300–2317.
- [10] McCabe G J, Clark M P, Serreze M C. Trends in Northern Hemisphere surface cyclone frequency and intensity[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(12): 2763–2768.
- [11] Simmonds I, Keay K. Extraordinary September Arctic sea ice reductions and their relationships with storm behavior over 1979–2008[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(19): L19715.
- [12] Brümmer B, Hoerber H. A mesoscale cyclone over the Fram Strait and its effects on sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D16): 19085–19098.
- [13] Brümmer B, Schröder D, Müller G, et al. Impact of a Fram Strait cyclone on ice edge, drift, divergence, and concentration: possibilities and limits of an observational analysis[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C12): C12003.
- [14] Hakkinen S, Proshutinsky A, Ashik I. Sea ice drift in the Arctic since the 1950s[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(19): L19704.
- [15] 余兴光. 中国第四次北极科学考察报告[M]. 北京:海洋出版社, 2011.
Yu Xingguang. The Report of 2010 Chinese Arctic Research Expedition[M]. Beijing: China Ocean Press, 2011.
- [16] 张树刚. 海水密集度反演以及北极中央区海冰和融池变化物理过程研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2012.
Zhang Shugang. Sea ice concentration algorithm and study on the physical process about sea ice and melt-pond change in central Arctic[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [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 Cuijuan, Zhang Zhanhai, Ling Tiejun, 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] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553–597.
- [19] 刘成龙, 赵进平. 夏季北极密集冰区范围确定及其时空变化研究[J]. *海洋学报*, 2013, 35(4): 36–46.
Liu Chenglong, Zhao Jinping. Pack ice extent and its spatiotemporal variation in summer Arctic[J]. *Haiyang Xuebao*, 2013, 35(4): 36–46.
- [20] Massom R A, Harris P T, Michael K J, et al. The distribution and formative processes of latent-heat polynyas in East Antarctica[J]. *Annals of Glaciology*, 1998, 27: 420–426.
- [21] Serreze M C, Barrett A P. The summer cyclone maximum over the central Arctic Ocean[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(5): 1048–1065.

Exploration of anomalous low sea ice concentration phenomenon in the Central Arctic

Li Cheng^{1,2}, Su Jie¹, Wei Lixin², Liang Hongjie¹, Huang Fei¹, Zhao Jinping¹

(1. *Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 2. *Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, State Oceanic Administration, Beijing 100081, China*)

Abstract: In recent years, there emerges a phenomenon that Central Arctic should experience anomalous low sea ice concentration. To analyze explicitly the causes, the Low Concentration in Central Arctic (LCCA) index is defined by using the ERA-Interim reanalysis data. Within the period of June to September from 2009 to 2016, there were 6 cases recognized as the peaks of LCCA index. The results show that the leading factor of low sea ice concentration is not the local thermal condition. Dynamically, the drifting pattern of sea ice and the location of region with low sea ice concentration response consistently to the atmospheric circulation. Particularly, cyclones used to be found north of 70°N before the 6 peaks of LCCA index occurred. These cyclones moved towards north with hot air from lower latitudes causing divergence and rapid melting of sea ice. In 3 cases of 6, cyclones were accompanied with Dipole Anomaly (DA) pattern. LCCA index correlates positively with northward heat advection across the circle of 84°N as well as the divergence of Central Arctic sea ice. Before the LCCA peak days, the northward heat advection has greater effects on sea ice than the dynamic divergence.

Key words: low sea ice concentration; Central Arctic; sea ice; cyclone