夏季外来气旋对北极太平洋扇区海冰的影响

周舒¹, 张录军^{1,2,3,4*}, 周玮佳¹

1. 南京大学大气科学学院, 南京 210023;

2. 中国高校极地联合研究中心, 北京 100875;

3. 中国气象局-南京大学气候预测研究联合实验室, 南京 210023;

4. 江苏省气候变化协同创新中心, 南京 210023

* 联系人, E-mail: ljzhang@nju.edu.cn

2018-09-21 收稿, 2019-04-27 修回, 2019-04-28 接受, 2019-05-31 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFA0602100)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506011)和国家自然科学基金(40975040)资助

摘要 近40年来, 北极太平洋扇区8~10月海冰面积显著减少, 其减少速率几乎是大西洋扇区的3倍, 且该扇区海冰面积年际变率显著, 标准差达 $6 \times 10^5 \text{ km}^2$. 基于ECMWF提供的再分析气象数据和NSIDC提供的海冰密集度、海冰运动及气旋资料, 分析了外来气旋活动对北极太平洋扇区海冰面积年际变化的影响. 研究表明: 每年7~9月的外来气旋异常偏多(偏少)时, 北极太平洋扇区海冰面积明显减少(增多), 二者负相关最显著的区域位于楚科奇海、波弗特海、东西伯利亚海及中央海区. 深入分析其作用机制发现: 外来气旋活动加强时, 受其对地表能量平衡和温度平流等综合影响, 北极扇区大部分地区气温都明显上升, 从而促进了该扇区海冰消融. 同时气旋活动带来的大风会驱动海冰运动, 使得边缘海区易形成更多开阔水域, 海水显著增暖, 加剧边缘海海冰融化. 除此之外, 气旋大风还会造成东西伯利亚海海冰向东和向南更暖的区域输送, 也利于海冰的消融. 总体来看, 北极太平洋扇区海冰消融主要与气旋的热力作用有关, 其动力作用主要影响边缘海域.

关键词 北极气候, 外来气旋, 海冰, 太平洋扇区

作为气候系统的重要组成部分, 北极海冰对于维持极地乃至全球区域的能量平衡都起到重要作用. 然而, 近几十年来, 北极年平均海冰面积正以 $3.5\% \sim 4.1\% \text{ } 10 \text{ a}^{-1}$ 的速率快速减小, 夏季海冰面积减少速率更是达到了 $9.4\% \sim 13.6\% \text{ } 10 \text{ a}^{-1}$ ^[1,2], 并在2012和2007年分别达到了有卫星观测记录以来的最小值和次小值^[3,4]. 与此同时, 北极海冰的厚度和体积也明显减少^[5], 意味着北冰洋的多年冰正逐渐转变为更薄的季节冰^[6].

针对北极海冰的异常变化, 国内外学者已展开诸多研究, 其既受到海温、洋流等海洋要素影响, 同时与大气环流的变化也存在密切联系^[7]. Walsh等人^[8]及Thompson和Wallace^[9]指出1988年后北极中央区表面气

压的显著降低以及冬季表面气温的升高, 极大地改变了当年和随后北极海冰的时空分布和变化情况; Wu等人^[10]则认为表面风场的动力强迫对北极9月海冰面积的极小值及长期减少趋势起到重要作用; Rigor等人^[11]则发现北极海冰的显著减少与高AO(Arctic Oscillation)指数年对应的大气环流及海冰漂流异常有关. 同时, 众多学者认为, 随着海冰的变薄变新^[5], 作为北极活跃的天气系统, 气旋活动对极地海冰消融的影响也愈来愈重要^[12~14]. Parkinson和Comiso^[12]指出2012年8月4~6日强气旋经过北极太平洋扇区, 导致了楚科奇海和白令海面积达 $0.4 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的海冰脱离主体浮冰群, 这会使得更多洋面暴露, 洋面增暖, 从而会促进海冰融

引用格式: 周舒, 张录军, 周玮佳. 夏季外来气旋对北极太平洋扇区海冰的影响. 科学通报, 2019, 64: 1922–1929

Zhou S, Zhang L J, Zhou W J. The role of extratropical cyclones for summertime sea ice melting in Arctic Pacific sector (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 1922–1929, doi: 10.1360/N972018-00962

化。Zhang等人^[4]通过模式实验进一步证实,该气旋确实影响了9月最小的北极海冰面积,虽然影响幅度相对较小。北极气旋的活动,伴随着大风和降水,会影响底层云量分布、向极的水汽和热量输送等,这些过程都会对海冰消融产生影响^[15-19]。已有学者对北极气旋活动与夏季北极海冰面积变化间的关系进行了一些探究。Screen等人^[13]指出前期5~7月份气旋个数偏少有利于夏季北极海冰的消融。而Simmonds和Keay^[14]的研究表明9月气旋活动强度和范围与同期北极海冰面积间具有很好的正相关。

值得注意的是,前人研究大都将北极看作一个整体。实际上,无论是海冰变化还是气旋活动都存在明显的区域性差异。许多研究者都指出夏季海冰减少在北极太平洋扇区最为显著^[20,21]。从图1也可以看出,与北极大西洋扇区海冰面积各季节一致下降不同,太平洋扇区海冰面积仅在夏季显著减少。同时,Serreze和Barrett^[22]研究指出,在夏季北极太平洋扇区的气旋活动也最为活跃。夏季北极地区活跃的气旋既包括在本地生成的原生气旋,也包括从南部不同区域移入极区的外来气旋。Zhang等人^[23]及Crawford和Serreze^[24]研究指出南部移入的外来气旋较原生气旋而言,其强度更大,能

量更强,生命期更长,同时Sorteberg和Walsh^[19]分析还发现这类气旋的活动与进入极区的水汽输送有很好的关系。外来气旋的活动为北极带来热量、水汽及动量等,对北极气候会产生重要影响^[25,26]。由此,本文将着重讨论夏季北极太平洋扇区外来气旋活动对于该区域海冰消融的作用机制,理解近几十年来北极夏季海冰剧烈变化的原因,对未来海冰的模拟与预测也有所裨益。

1 资料方法介绍

由于判断和追踪温带气旋其固有的复杂性,目前如何准确定义温带气旋的构成及其所处位置还没有达成共识。但在过去几十年间,众多研究人员已经探索了一系列客观的气旋识别和跟踪方法^[27]。在当前可用的方案中,Serreze等人^[28]的气旋追踪方法已被广泛地运用在北半球温带气旋的研究中^[29]。该方案通过锁定比其邻近格点海平面气压值至少低2 hPa的网格点,进行一系列判断,从而实现气旋的识别和跟踪。同时,基于与大量天气图人工分析结果的比较,该方案在设计时对于网格内多重嵌套系统及气旋移动方向等也进行了考虑,因此对于一些比较难以判断的情况,例如两个独

图1 1979–2016年北极海冰面积(a)及1980–2016年夏季太平洋扇区 Δ SIA(b)年际变化曲线。(a)括号内数字为线性趋势系数(单位: $10^6 \text{ km}^2 10 \text{ a}^{-1}$),红色数字代表通过95%以上的信度检验;(b)黑虚线代表 $\pm 1\sigma$ (标准差)

Figure 1 The interannual variation of SIA in Arctic for the period 1979–2016 (a) and summer Δ SIA in the APS for the period 1980–2016 (b). The numbers in brackets of (a) denote linear regression coefficients (unit: $10^6 \text{ km}^2 10 \text{ a}^{-1}$), of which red is statistically significant at the 95% or greater. The black dotted lines of (b) represent $\pm 1\sigma$ (standard deviation)

立系统被共同等压线包围合并,也能进行有效识别,能较好地解决气旋误判,漏判等问题^[28].本研究也依赖于Serreze的方案展开,采用了NSIDC提供的1979-01-01~2016-12-31逐6 h北半球气旋特征数据集(<https://nsidc.org/data/nsidc-0423>)^[30].该数据集基于Sereze(1997)气旋自动追踪方案^[28],对NCEP-NCAR提供的 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,逐6 h海平面气压再分析资料进行定位追踪,从而得到气旋强度、气旋位置等信息.本文主要对气旋个数这一变量进行考察,其指在研究时间研究范围内统计到的气旋数目^[23],能较好表征研究区域在一段时间内气旋活动的多寡.

本文所用的逐月海冰密集度、海冰运动资料(1979~2016年)则来自美国冰雪中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC),水平分辨率为 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$.逐月大气资料来自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) ERA-interim数据集,主要变量包括2 m气温、表面海温、表面气压、10 m风场及整层水汽等,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$.

为更好地表征海冰的年际变化,本文根据文献^[13]定义了海冰密集度逐年变化量 ΔSIC ($\Delta \text{SIC}^y = \text{SIC}^y - \Delta \text{SIC}^{y-1}$, y 为年份, SIC为海冰密集度(sea ice concentration)),同时也定义了海冰面积逐年变化量 ΔSIA ($\Delta \text{SIA}^y = \text{SIA}^y - \Delta \text{SIA}^{y-1}$, y 为年份, SIA为海冰面积(sea ice area)).其中在计算SIA时,不考虑海冰密集度小于15%的区域^[20],且为排除海冰变化长期趋势的影响,在计算 ΔSIC 与 ΔSIA 时对SIC与SIA均做了去倾处理.

此外参考前人工作^[20,21],本文定义 $120^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{W}$, $70^{\circ} \sim 85^{\circ}\text{N}$ 为北极太平洋扇区, $0^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{E}$, $70^{\circ} \sim 85^{\circ}\text{N}$ 为北极大西洋扇区.经过北极太平洋扇区,并且生成在 70°N 以南的气旋,即为经过该区域的外来气旋^[19].并根据气旋生成位置,将其大致划为4个源地,分别是欧亚大陆($45^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{E}$),太平洋($150^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{W}$),大西洋($60^{\circ}\text{W} \sim 45^{\circ}\text{E}$)及北美地区($60^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{W}$).对于季节的划分,考虑到北极海冰3月面积最大,2和4月次之;9月面积最小,8和10月次之^[20,31].本文在计算海冰面积的季节平均时,采用了汪代维等人^[31]提出的分季法,即:2~4月划分为冬季;8~10月划分为夏季;5~7月划分为春季;11月~次年1月划分为秋季.根据这种分季方法,冬、夏两季节分别代表了海冰面积的极大和极小状态,而春、秋季则对应海冰的消融和增长阶段.与传统季节划分方法相比,该分季方法更适用于针对北极海冰的研究.

2 结果分析

图1(a)对比了1979~2016年各季节北极太平洋和大西洋扇区海冰面积的变化.可以看出,近40年来,太平洋扇区海冰面积仅在夏季急剧减小,且其减小速率几乎是同时期大西洋扇区的3倍.除明显减少趋势外,该扇区夏季海冰面积的年际变率也尤为显著(标准差达 $6 \times 10^5 \text{ km}^2$),海冰面积逐年变化量 ΔSIA 平均变幅更达到 $2.1 \times 10^5 \text{ km}^2$.在1980~2016年期间,有17年为海冰面积“增加年”($\Delta \text{SIA} > 0$),其中1994, 1996, 2004, 2008及2013年较前一年海冰面积增加最为显著($\Delta \text{SIA} > +\delta$, δ 为标准差);而有20年为海冰面积“减少年”($\Delta \text{SIA} < 0$),其中1993, 1997, 2002, 2007, 2014年减少最为显著($\Delta \text{SIA} < -\delta$).

通过合成分析,图2对比了5~12月北极太平洋扇区海冰面积(显著)增加年与(显著)减少年来气旋个数异常情况.可以看出,与其他月份不同,7~9月外来气旋个数异常变化明显反向.在海冰面积减少年,7~9月外来气旋个数异常偏多,而在增加年却异常偏少.且在冰面积显著增加和减少的年份,其差异更为明显.

在此基础上,图3进一步对比了海冰面积显著增加年和显著减少年7~9月进入北极太平洋扇区外来气旋的轨迹分布.不难看出,显著减少年较显著增加年而言,该扇区在7~9月的外来气旋活动不仅更频繁,范围也更广.在海冰显著增加年,外来气旋活动主要集中在太平

图2 北极太平洋扇区夏季海冰面积(显著)增加年与(显著)减少年5~12月各月合成平均的外来气旋个数异常.阴影部分代表未通过95%信度水平区域

Figure 2 The composite-mean count anomalies of extratropical cyclone from May to December during the APS summer sea ice area (significantly) increased years (blue) and (significantly) reduced years (red). The gray shading denotes areas not exceeding the 95% confidence levels

图3 北极太平洋扇区夏季海冰面积显著增加年(a)及显著减少年(b)7~9月外来气旋轨迹分布. 红色、品红色、蓝色和绿色分别代表气旋来自于欧亚、大西洋、太平洋和北美地区, 点●表示各气旋生成位置

Figure 3 The trajectory distributions of extratropical cyclones into APS from July to September during the APS summer sea ice area significantly increased years (a) and significantly reduced years (b). The red, magenta, blue, and green colors denote cyclones that formed in Eurasia, the Atlantic, the Pacific, and North America, respectively. The dots ● show the locations of cyclone formation

洋扇区西侧(东西伯利亚海及北极中央海区)(图3(a));而在显著减少年, 西侧气旋活动明显加强, 同时气旋活动范围也向东扩张, 扇区东侧的楚科奇海和波佛特海也存在较多气旋活动(图3(b)). 进一步统计发现, 在海冰面积增加年, 7~9月欧亚大陆、北太平洋、北美大陆及北大西洋进入北极太平洋扇区的外来气旋个数占比分别为55.96%, 15.29%, 3.36%和25.38%, 而在海冰面积减少年各源地占比则分别为46.52%, 20%, 3.91%和29.57%. 在增加年和减少年期间, 北极太平洋扇区7~9月的外来气旋主要都来自于欧亚大陆, 但是在减少年, 来源于北大西洋和北太平洋的气旋占比明显增加. 这说明当7~9月北极太平洋扇区外来气旋活动增加, 尤其是源自大洋、携带有大量暖湿水汽的外来气旋增加时, 该扇区夏季海冰面积将明显减少. 需要说明的是, 除外来气旋外, 极区还存在局地原生的气旋活动. 但对比减少年与增加年原生气旋个数发现, 其7~9月的个数差异很小(图略), 且原生气旋相较外来气旋而言, 具有生命期短、能量小、强度弱等特点^[23,24]. 它们对极地能量平衡, 水汽输送的影响也不及外来气旋重要^[19]. 因而, 本文仍主要就7~9月外来气旋活动与北极海冰面积年际变化的关系展开分析.

图4说明了1980~2016年7~9月北极太平洋扇区外来气旋个数与夏季海冰密集度逐年变化量 Δ SIC相关系数的空间分布. 由图4可知: 除西南部拉普捷夫海外, 北

极太平洋扇区大部分区域 Δ SIC与外来气旋个数表现为负相关, 其在东西伯利亚海、楚科奇海及中央海区相关性最为显著(超过95%置信水平), 最大相关达到了-0.55. 因而整体上, 该扇区夏季海冰面积的逐年变化量 Δ SIA与7~9月外来气旋个数也为负相关, 相关系数达-0.41(超过95%置信水平). 这说明, 当7~9月北极太平洋扇区外来气旋异常增多时, 该扇区大部分区域海冰消融加剧, 夏季海冰面积较前一年减少; 而当该地区7~9月外来气旋异常减少时, 夏季海冰则较前一年增加. 这与前文合成分析结果一致. 可见, 近40年来太平洋扇区7~9月外来气旋活动的确对该扇区海冰面积的年际变化产生了重要影响.

那么, 7~9月外来气旋活动具体如何影响北极太平洋扇区夏季海冰消融呢? 为了进一步理解其背后的机制, 将标准化后的7~9月外来气旋个数分别回归到同期2 m气温、表面海温、整层水汽、表面气压、10 m风场及海冰运动场. 从图5(a)可以看出, 随着外来气旋活动增加, 除西南部拉普捷夫海区域外, 北极大部分区域气温都会有所上升, 尤其太平洋扇区东侧增温显著. 气旋活动通过诸多热力过程对大气温度产生影响, 一方面气旋活动会影响水汽和云的分布, 改变地表能量平衡, 从而影响地表温度; 另一方面气旋活动引起的温度平流也能对局地的冷暖造成影响. 图5(c)显示, 气旋活动越频繁, 太平洋扇区东侧水汽含量也越多. 水汽作为

图4 1980~2016年北极夏季 Δ SIC与JAS(7~9月)北极太平洋扇区外来气旋个数相关系数的空间分布。阴影部分通过95%信度检验

Figure 4 The spatial distribution of correlation coefficients between the Arctic summer Δ SIC and the extratropical cyclone counts into APS in JJA from 1980 to 2016, the shadings indicate the 95% confidence levels

重要的温室气体,其含量的增多,将导致向下长波辐射的明显增加,从而增暖大气。同时,图6(b)则表明,气旋活动频繁时,扇区东侧盛行南风,暖平流也将十分利于该侧温度的增加。可见,北极太平洋扇区7~9月外来气旋活动的增多,最终会使得太平洋扇区大部分地区变暖,对该地区海冰消融产生重要影响。图5(b)则揭示了外来气旋频数与海温之间的关系。可以看出,频繁的气旋活动,会导致除西南部拉普捷夫海外,边缘海区海温

明显上升。海温的增加与气旋的动力作用有密切关系,气旋所带来的强而不均匀的风场,驱动海冰运动增强,会使得冰盖变形,造成冰裂、冰间水道等现象,使得更多洋面暴露。近些年夏季,这些区域几乎不会再发生冻结,水面对辐射能量吸收加强,从而导致上层海洋的局部变暖,又促进了中央海冰区域的融化速度。Kriegsmann和Brümmer^[32]的研究也指出在边缘碎冰区这一作用比较明显。除此之外,受气旋性大风驱动,海冰运动呈现为类气旋性漂流(图6(c)),造成扇区西侧的东西伯利亚海海冰向东和向南边更暖的区域输送,也将有利于海冰的消融。可见,气旋通过动力作用对海冰消融也会产生一定的影响。但总体看来,其影响区域主要在边缘海区,远不及气旋热力过程的影响范围(图5(a))。所以,对于北极太平洋扇区大部分地区而言,外来气旋对于海冰消融的影响主要以热力作用为主,其动力作用主要影响边缘海域。

3 结论与讨论

本文的研究表明,近40年来北极太平洋扇区夏季(8~10月)海冰面积显著减少,其减少速率几乎是大西洋扇区的3倍。同时该扇区的年际变率也十分显著(标准差为 $6 \times 10^5 \text{ km}^2$),海冰面积逐年变化量 Δ SEA平均变幅达到 $2.1 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

采用统计诊断分析发现,该扇区夏季海冰面积的年际变化与每年7~9月该扇区外来气旋个数密切相关。当7~9月外来气旋个数增多时,北极太平洋扇区夏季海冰面积较前一年会减少,而当7~9月外来气旋个数偏少时,海冰面积则会有所增加。除了该扇区西南部的拉普捷夫海外,整个北极太平洋扇区海域都与气旋个数呈

图5 1980~2016年7~9月北极太平洋扇区外来气旋个数(标准化)回归的7~9月2 m气温($^{\circ}\text{C}$)(a)、表面海温($^{\circ}\text{C}$)(b)及整层水汽分布(kg m^{-2})(c)。阴影部分表示通过95%信度检验

Figure 5 Regression of July-September 2 m temperature ($^{\circ}\text{C}$) (a), surface sea temperature ($^{\circ}\text{C}$) (b) and integrated water vapor (kg m^{-2}) (c) on the July-September extratropical cyclone counts into APS (normalized) for the period form 1980 to 2016 (the shadings indicate the 95% confidence levels)

图6 1980~2016年7~9月北极太平洋扇区外来气旋个数(标准化)回归的7~9月海平面气压场(hPa)(a)、10 m风场(m s^{-1})(b)及海冰运动(m s^{-1})(c)。阴影部分表示通过95%信度检验

Figure 6 Regression of July–September sea level pressure (hPa) (a), 10 m wind (m s^{-1}) (b), and sea ice motion (m s^{-1}) (c) on the July–September extratropical cyclone counts into APS (normalized) for the period from 1980 to 2016 (the shadings indicate the 95% confidence levels)

现为一致的负相关, 其中在楚科奇海、波弗特海、东西伯利亚海及中央海区二者相关性最为显著。研究结果还指出影响该扇区的夏季外来气旋主要来源于欧亚大陆, 且在海冰减少年, 源自大洋的外来气旋明显增多, 这些携带大量热量和水汽的气旋会促进该扇区海冰融化。

进一步研究外来气旋活动对北极海冰面积年际变化的影响机制, 我们发现: 当外来气旋活动频繁时, 极区水汽、风场、温度场及海冰运动等都将产生相应变化。受其对地表能量平衡和温度平流等综合影响, 北极扇区大部分地区气温都明显上升, 从而促进了该扇区海冰消融。同时气旋活动带来的大风会驱动海冰运动, 使得边缘海区易形成更多开阔水域, 海水显著增暖, 加剧边缘海海冰融化。除此之外, 气旋大风还会造成扇区西侧东西伯利亚海海冰向东和向南更暖的区域输送, 也利于海冰的消融。总体来看, 北极太平洋扇区海冰消融主要与气旋的热力作用有关, 其动力作用主要影响边缘海域。值得注意的是, 前人研究也指出, 气旋活动

频繁导致的云量增多, 穿极漂流减弱, 对海冰消融会产生一定的抑制作用^[13]。气旋活动伴随着大量对极区海冰消融产生影响的过程, 本文仅就最后的综合影响展开了分析, 而并未对各过程对夏季海冰消融的贡献进行定量的评估, 亟待以后的工作展开进一步研究。

需要说明的是, 本文虽然指出7~9月北极太平洋扇区外来气旋个数与该扇区夏季海冰面积的年际变化间存在显著的负相关, 但分析发现1979~2016年北极太平洋扇区夏季外来气旋个数并无显著的趋势性变化, 这与前人的研究结果一致^[22]。这似乎说明对于海冰的长期趋势性变化, 气旋作用并不明显。但随着北极海冰的变新变薄, 其消融对于能量的需求减少, 海冰对各类扰动的敏感性也明显加强, 因而有理由相信, 在北极持续增暖的未来, 作为北极最重要的天气系统之一, 气旋活动在冰海消融中将会扮演越来越重要的角色。因此, 关注前期气旋活动的变化, 对加深理解夏季北极海冰异常变化机制和提高海冰季节预报能力将具有重要意义。

参考文献

- 1 Vaughan D G, Comiso J C, Allison, et al. Observations: Cryosphere. In: Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, et al., eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 317–382
- 2 Ogi M, Rigor I G. Trends in Arctic sea ice and the role of atmospheric circulation. *Atmos Sci Lett*, 2013, 14: 97–101
- 3 Zhang J, Lindsay R, Steele M, et al. What drove the dramatic retreat of arctic sea ice during summer 2007? *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L11505
- 4 Zhang J, Lindsay R, Schweiger A, et al. The impact of an intense summer cyclone on 2012 Arctic sea ice retreat. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 720–726
- 5 Maslanik J A, Fowler C, Stroeve J, et al. A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L24501
- 6 Haine T W N, Martin T. The Arctic-Subarctic sea ice system is entering a seasonal regime: Implications for future Arctic amplification. *Sci Rep*,

- 2017, 7: 4618
- 7 Döscher R, Vihma T, Maksimovich E. Recent advances in understanding the Arctic climate system state and change from a sea ice perspective: A review. *Atmos Chem Phys*, 2014, 14: 13571–13600
 - 8 Walsh J E, Chapman W L, Shy T L. Recent decrease of sea level pressure in the central Arctic. *J Clim*, 1996, 9: 480–486
 - 9 Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 1297–1300
 - 10 Wu B, Overland J E, D'Arrigo R. Anomalous Arctic surface wind patterns and their impacts on September sea ice minima and trend. *Tellus A-Dyn Meteor Oceanogr*, 2012, 64: 18590
 - 11 Rigor I G, Wallace J M, Colony R L. Response of sea ice to the Arctic Oscillation. *J Clim*, 2002, 15: 2648–2663
 - 12 Parkinson C L, Comiso J C. On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 1356–1361
 - 13 Screen J A, Simmonds I, Keay K. Dramatic interannual changes of perennial Arctic sea ice linked to abnormal summer storm activity. *J Geophys Res*, 2011, 116: D15105
 - 14 Simmonds I, Keay K. Extraordinary September Arctic sea ice reductions and their relationships with storm behavior over 1979–2008. *Geophys Res Lett*, 1979, 36: L19715
 - 15 Ogi M, Wallace J M. The role of summer surface wind anomalies in the summer Arctic sea ice extent in 2010 and 2011. *Geophys Res Lett*, 2012, 39: L09704
 - 16 Kay J E, L'Ecuyer T, Gettelman A, et al. The contribution of cloud and radiation anomalies to the 2007 Arctic sea ice extent minimum. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L08503
 - 17 Woods C, Caballero R. The role of moist intrusions in winter Arctic warming and sea ice decline. *J Clim*, 2016, 29: 4473–4485
 - 18 Villamil-Otero G A, Zhang J, He J, et al. Role of extratropical cyclones in the recently observed increase in poleward moisture transport into the Arctic Ocean. *Adv Atmos Sci*, 2018, 35: 85–94
 - 19 Sorteberg A, Walsh J E. Seasonal cyclone variability at 70°N and its impact on moisture transport into the Arctic. *Tellus A*, 2008, 60: 570–586
 - 20 Sui C J, Zhang Z H, Wu H D, et al. Interannual and interdecadal variability of Arctic sea ice extent from 1979–2012 (in Chinese). *Chin J Polar Res*, 2015, 27: 174–182 [隋翠娟, 张占海, 吴辉碇, 等. 1979–2012年北极海冰范围年际和年代际变化分析. 极地研究, 2015, 27: 174–182]
 - 21 Lee H J, Kwon M O, Yeh S W, et al. Impact of poleward moisture transport from the North Pacific on the acceleration of sea ice loss in the Arctic since 2002. *J Clim*, 2017, 30: 6757–6769
 - 22 Serreze M C, Barrett A P. The summer cyclone maximum over the central Arctic Ocean. *J Clim*, 2008, 21: 1048–1065
 - 23 Zhang X, Walsh J E, Zhang J, et al. Climatology and interannual variability of Arctic cyclone activity: 1948–2002. *J Clim*, 1948, 17: 2300–2317
 - 24 Crawford A D, Serreze M C. Does the summer Arctic frontal zone influence Arctic Ocean cyclone activity? *J Clim*, 2016, 29: 4977–4993
 - 25 Qin T, Wei L X, Sun H L. Statistic and variability of cyclones in Arctic in 1979–2012 (in Chinese). *Mar Forecast*, 2015, 32: 39–45 [秦昕, 魏立新, 孙虎林. 进入极区温带气旋的时空变化特征分析. 海洋预报, 2015, 32: 39–45]
 - 26 Wu J, Gao G P, Xu F X, et al. Main features of cyclones migrating into the Arctic via 70°N (in Chinese). *Chin J Polar Res*, 2018, 30: 391–405 [吴静, 高郭平, 徐飞翔, 等. 向极跨越70°N气旋的主要特征分析. 极地研究, 2018, 30: 391–405]
 - 27 Neu U, Akperov M G, Bellenbaum N, et al. IMILAST: A community effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms. *Bull Amer Meteor Soc*, 2013, 94: 529–547
 - 28 Serreze M C, Carse F, Barry R G, et al. Icelandic low cyclone activity: Climatological features, linkages with the NAO, and relationships with recent changes in the Northern Hemisphere circulation. *J Clim*, 1997, 10: 453–464
 - 29 Koyama T, Stroeve J, Cassano J, et al. Sea ice loss and Arctic cyclone activity from 1979 to 2014. *J Clim*, 2017, 30: 4735–4754
 - 30 Serreze M. Northern Hemisphere Cyclone Locations and Characteristics from NCEP/NCAR Reanalysis Data, Version 1. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, 2009, <https://doi.org/10.5067/XEPCLZKPAJBK>
 - 31 Wang D W, Yang X Q. Temporal and spatial patterns of Arctic sea ice variations (in Chinese). *Acta Meteor Sin*, 2002, 60: 129–138 [汪代维, 杨修群. 北极海冰变化的时间和空间型. 气象学报, 2002, 60: 129–138]
 - 32 Kriegsmann A, Brümmer B. Cyclone impact on sea ice in the central Arctic Ocean: A statistical study. *Cryosphere*, 2014, 8: 303–317

Summary for “夏季外来气旋对北极太平洋扇区海冰的影响”

The role of extratropical cyclones for summertime sea ice melting in Arctic Pacific sector

Shu Zhou¹, Lujun Zhang^{1,2,3,4*} & Weijia Zhou¹

¹ School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

² University Corporation for Polar Research, Beijing 100875, China;

³ China Meteorological Administration-Nanjing University (CMA-NJU) Joint Laboratory for Climate Prediction Studies, Nanjing 210023, China;

⁴ Jiangsu Collaborative Innovation Center for Climate Change, Nanjing 210023, China

* Corresponding author, E-mail: ljzhang@nju.edu.cn

Over the last four decades, the area of Arctic sea ice has decreased substantially during the end of melting season (August to October), along with significant regional differences. The decreasing rate averaged over sea ice area in the Arctic Pacific sector (APS) is about $-0.45 \times 10^6 \text{ km}^2 \text{ decade}^{-1}$ during 1979–2016, which is almost three times of that in the Atlantic sector. Besides, great year-to-year fluctuations are observed in the summertime sea ice area of APS with the standard deviation up to $6 \times 10^5 \text{ km}^2$. The conspicuous interannual variability, however, has received relatively little attention, with its mechanisms not clear yet. In fact, the summertime Arctic sea ice melting is impacted by a number of factors, including surface winds, low-level Arctic clouds, moisture and heat transports into the Arctic, which are all closely connected with extratropical cyclone activities in the Arctic. The extratropical cyclones originated mainly from mid-latitude are often accompanied by stronger winds and heavier precipitation than those generated from Arctic cyclones. In addition, the total extratropical cyclone activity shows a close relationship with the total moisture and heat transports into the Arctic. It is hence hypothesized that more extratropical cyclones entering the Arctic would intensify surface winds and bring about a burst of high moisture content, inducing the more significant sea ice melting in summer. Subsequently, using monthly datasets of sea ice concentration, sea ice motion, and cyclone characteristics for the period of 1979–2016 from National Snow and Ice Data Center (NSIDC), the influence of extratropical cyclones entering the APS on the local sea ice area is investigated in the annual time scale. The cyclone characteristics dataset have been obtained based on the updated Serreze (1997) algorithm to daily Sea Level Pressure (SLP) data with six-hour intervals, which have been widely used to monitor extratropical cyclones in previous studies. Statistical analysis demonstrates that it plays a crucial role of the extratropical cyclones entering the APS in July, August and September (JAS), which are mostly from the Eurasia. The summertime sea ice area in APS reduces (increases) significantly with the increasing (decreasing) extratropical cyclones in JAS. The negative correlation is especially significant in the Chukchi Sea, the Beaufort Sea, the East Siberian Sea and the Central Arctic Ocean. Based on the monthly ERA-interim reanalysis data from 1978 to 2016, including 2 m temperature, sea surface temperature, water vapor, surface level pressure, provided by European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECWMF), it is also revealed that the activity of extratropical cyclones can impact sea ice both thermodynamically and dynamically. Intensified extratropical cyclones would affect processes of surface energy balance and heat advection, leading to the increasing air temperature above the APS and contributing to the ice melting. Meanwhile, surface winds associated with the cyclone are likely to affect the sea ice motion and expand the area of open water, which result in ocean warming and ice melting, especially in the marginal ice zone. Moreover, in the East Siberian Sea, cyclonic winds tend to transport the ice eastwards and southwards to warmer areas, which also aggravate the further melting. In general, the melting of summertime sea ice in the APS is greatly affected by thermodynamic processes of extratropical cyclones, while dynamic processes have limited impact, particularly in the marginal ice zone. It should be noted that, as the Arctic continues to warm up, mounting evidences suggest that the Arctic sea ice has become continuously thinner, which means less energy is required to achieve a reduction in areal coverage. Therefore, abundant reasons indicate that the cyclone activity will play an increasingly important role in the Arctic sea ice variability and it will remain a heated topic of debate for the coming future.

Arctic climate, extratropical cyclones, sea ice, Pacific sector

doi: [10.1360/N972018-00962](https://doi.org/10.1360/N972018-00962)