

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. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2015.09.0985. [Zhao Jinping, Shi Jiuxin, Wang Zhaomin, et al. Arctic amplification produced by sea ice retreat and its global climate effects[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(9): 985-995. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2015.09.0985.]

北极海冰减退引起的北极放大机理与全球气候效应*

赵进平¹, 史久新¹, 王召民², 李志军³, 黄菲¹

(1. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044;
3. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

摘要:自20世纪70年代以来,全球气温持续增高,对北极产生了深刻的影响。21世纪以来,北极的气温变化是全球平均水平的2倍,被称为“北极放大”现象。北极海冰覆盖范围呈不断减小的趋势,2012年北极海冰已经不足原来的40%。如此大幅度的减退是过去1450年以来独有的现象。科学家预测,不久的将来,将会出现夏季无冰的北冰洋。全球变暖背景下北极内部发生的正反馈过程是北极放大现象的关键,不仅使极区的气候发生显著变化,而且对全球气候产生非常显著的影响,导致很多极端天气气候现象的发生。北极科学的重要使命之一是揭示这些正反馈过程背后的机理。北极放大有关的重大科学问题主要与气—冰—海相互作用有关,海冰是北极放大中最活跃的因素,要明确海冰结构的变化,充分考虑融池、侧向融化、积雪和海冰漂移等因素,将海冰热力学特性的改变定量表达出来。海洋是北极变化获取能量的关键因素,是太阳能的转换器和储存器,要认识海洋热通量背后的能量分配问题,即能量储存与释放的联系机理,认识淡水和跃层结构变化对海气耦合的影响。全面认识北极气候系统的变化是研究北极放大的最终目的,要揭示气—冰—海相互作用过程、北极海洋与大气之间反馈的机理、北极变化过程中的气旋和阻塞过程、北极云雾对北极变化的影响。在对北极海冰、海洋和气候深入研究的基础上,重点研究极地涡旋罗斯贝波的核心作用,以及罗斯贝波变异的物理过程,深入研究北极变化对我国气候影响的主要渠道、关键过程和机理。

关键词: 北极放大; 海洋强迫; 海冰; 气候变化; 气—冰—海相互作用

中图分类号: P343.6⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2015)09-0985-11

北极是地球的寒极,是北半球气候系统稳定的重要基础之一。长期以来,北冰洋由密集的海冰覆盖,夏季北冰洋海冰融化面积仅占冬季的10%左右^[1]。自从20世纪70年代以来,全球气温持续升高,全球变暖已经成为不争的事实^[2]。全球变暖对北极产生了持续的影响,导致北极逐渐变暖。21世纪以来,北极增暖的趋势是全球平均水平的2倍,被称为“北极放大”现象^[3]。

北极放大的原因之一是其下垫面主要是海洋。夏季海冰厚度和覆盖面积的减小直接导致海洋吸收太阳辐射能的增加,一方面加剧海冰的融化,一方面越来越多的开阔海面对大气产生异常加热,形成正反馈效应^[4,5]。在各种可能的反馈中,最为明确的正反馈是海冰—气温反馈(即冰雪反照率反馈)^[3]。这种加快的正反馈过程不仅会影响极区的气候变化,而且还会加剧北极对高纬气候的放大效应。由

收稿日期: 2015-06-16; 修回日期: 2015-08-12.

* 基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划“北极海水减退引起的北极放大机理与全球气候效应”(编号: 2015CB953900); 国家自然科学基金重点项目“北极海冰与上层海洋环流耦合变化及其气候效应”(编号: 41330960) 资助。

作者简介: 赵进平(1954-),男,吉林省吉林人,研究员,主要从事北极海洋学研究. E-mail: jpzhao@ouc.edu.cn

于更加温暖的寒极改变了地球热机的行为,对全球气候产生非常显著的影响^[6]。海冰和海洋的变化过程将会导致北极气候变化到达“临界点”(tipping point^[7]),产生强烈的全球效应^[7-9]。

本文根据国内外最新研究成果,归纳关于北极海冰减退引起的北极放大机理与全球气候效应有关的主要科学问题,从更广阔的视野看待北极的变化,指出需要重点开展的研究工作,促进多学科交叉,推动北极科学的发展。

1 北极海冰快速变化的关键物理因素

北极海冰的变化与全球变暖几乎是同时发生的。20世纪70年代起,北极海冰覆盖范围呈不断减小的变化趋势^[10-13],海冰厚度和海冰密集度也持续降低^[14,15],北冰洋多年冰减少^[16]。海冰变化的早期主要是海冰厚度的变化,海冰覆盖率的变化并不显著,没有引起足够的注意。21世纪以来,海冰覆盖范围出现显著变化。2007年发生了北极海冰覆盖面积突然减少31%的事件,引起了北极科学界的高度关注^[17,18]。2012年,北极海冰又一次发生了骤减,海冰覆盖范围降到历史新低(http://nsidc.org/sotc/sea_ice.html),是迄今观测到的最小海冰覆盖率。

最新的研究表明,2007年和2012年夏季北极海冰覆盖面积大幅度减少在过去1450年以来都是独一无二的^[19]。CMIP5模拟结果显示,在RCP8.5情景下,模式结果无一例外地表现出在未来20~40年会出现夏季无冰的北冰洋^[4,20-22]。海冰的减少被认为是北极放大现象的关键因素^[3]。海冰的减少不仅与气温升高有关,还受以下各种因素的影响:

(1) 随着北极气温的升高,海冰内部结构发生了微妙的变化。海冰吸收外界热量,冰晶体之间的卤水通道扩张,冰内部的固态、液态、气态成分比例不断发生变化。冰的结构体现为与以往不同的复合材料,冰的光学、热学、力学、电学、磁学等性质发生相应的变化。其中光学、热学性质的变化决定了海冰在生消过程中的热质平衡;力学性质变化决定了海冰在外界动力下的破碎过程,这些变化直接决定海冰快速变化过程^[23]。

(2) 冰面融池是积雪融化的产物,迄今观测到夏季北极最大的融池覆盖率达到56%以上,对海冰的融化有不可忽视的影响。由于融池表面反照率低,融池水吸收的太阳短波辐射多^[24],通过冲洗效应影响海冰的融化^[25],导致气—冰—海热力学结构

发生变化^[26,27],直接加快海冰的融化过程。近年来,通透的融池比例增大^[28],海冰的大尺度应变特征也发生了变化,进而影响海冰的动力破碎过程^[29]。

(3) 积雪变化是海冰变化最重要的因素之一。如果春季积雪快速融化,会使海冰直接暴露在日光下,导致夏季海冰大量消融。如果春季积雪保留到夏季,会大幅削减到达海冰的太阳辐射,使大量海冰保存到下一年^[30]。由于积雪的观测手段很少,人们对积雪的了解很不充分。卫星遥感反演积雪信息主要是光学遥感和微波遥感两大类^[31]。光学遥感只能用于研究积雪的覆盖范围,而被动微波遥感可以反演0.5 m以下厚度的积雪^[32]。Markus等^[33]利用SSM/I微波辐射计数据反演积雪深度,与船测月平均积雪深度相比,相关系数为0.81,平均偏差为3.5 cm。美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)发布了基于Aqua/AMSR-E数据反演的积雪深度产品^[34]。在北极,积雪深度反演的误差很大,尤其是对其准确性缺乏检验的手段。人们期待更准确的数据问世,以增加对积雪热力学作用的深入研究。

(4) 海冰的运动也是改变海冰特性的重要因素之一。北极海冰平均漂流场体现为穿极流和波弗特涡流2个主要特征。近年来随着海冰减少,北极海冰漂流速度增加^[35,36],2004—2009年的冰速增大46%/10a^[37]。北极中央区域冰速的变化被认为主要是由风场增强造成的,而北冰洋边缘海冰加速则是由海冰变薄引起的。Wang等^[38]的研究表明,海冰漂流场变化的不仅是冰速,而且体现为漂流类型的变化。根据1978—2006年的漂流数据分析,海冰漂流可以分为4种主要流型:标准流型(38%)、反气旋流型(15%)、气旋式流型(16%)以及反对称流型(15%)。这些流型表明,海冰的漂流有不同的辐聚辐散特征,对海冰的变化有多种影响。人们密切关注的是,当海冰进一步减退、密集度减小、冰厚变薄之后,海冰的漂流会有什么变化。

(5) 影响海冰漂流场变化的主要因素是大气环流的变化。海冰一方面受风应力的驱动而发生运动,另一方面又受到冰场内部的相互制约,二者并不完全一致,但有很高的相关性^[39]。北极涛动(the Arctic Oscillation, AO)指数是北极大气环流的重要指数。研究表明,当AO为正位相时,波弗特流涡较小,穿极流更靠近西北北冰洋;而当AO为负位相时,波弗特流涡范围很大,穿极流向东北北冰洋偏移^[40]。

综上所述,除了气温升高之外,海冰结构、冰面融池、冰面积雪和海冰运动构成了海冰融化的主要影响因素,其中大部分因素的作用还不清楚,有些参数的观测很困难,需要开发特殊的观测手段获取数据。在北极气温显著升高背景下,海冰内部结构发生了很大的变化,需要明确认识海冰结构的变化,并将其热力学特性的改变定量表达出来。北极的融池覆盖率升高会导致海冰迅速破碎,需要揭示融池本身的热力学特征及其对海冰的热力学和动力学过程的影响。北极的积雪在春季全部融化,是容易被忽视的因素,但事实上积雪的作用直接影响到夏季海冰的去留,需要深入揭示积雪与海冰变化的联系。此外,海冰厚度的变化、海冰的侧向融化和海冰漂移过程都是影响海冰变化的关键因素,相关的物理过程需要深入研究。

2 北极海冰变化导致的主要海洋过程

事实上,北极的海洋变化是影响海冰变化的最重要因素之一。北极海冰范围和密集度减小使得冰间水道增加,穿过冰间水道进入海洋的太阳辐射能增加,导致海洋获得了更多的热量,是“北极放大”过程的主要能量来源。过去30年的海冰减退极大地改变了北冰洋上混合层的热收支^[41]。数值模拟的结果表明,北冰洋上层海洋在21世纪增暖能量的80%来自于海表面的热通量^[42]。北冰洋的海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)从1995年左右开始出现升温,2000年之后更为突出,2007年夏季的SST距平高达 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[43]。在几乎全部被海冰覆盖的北极中央区,夏季海洋的上50 m层也有显著增温,混合层的温度能够高于冰点 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[44]。北极季节性无冰区面积年际差异很大,导致海—气间热通量发生较大的季节性和年际波动,对整个北冰洋热含量长期变化的贡献率接近 $1/3$ ^[45]。北冰洋上层海洋增暖最重要的现象是次表层暖水的出现^[46~48],后来国外将其称为近表层温度极大值(Near Surface Temperature Maximum^[49])。次表层暖水发生在20~40 m深度范围内,温度在 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,是储存太阳辐射的一种特殊形式。1993—2009年,次表层暖水的温度上升了 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[50]。次表层暖水的热量释放会导致北极海冰提前融化和延后冻结^[51],意味着季节性海冰区的范围正在扩大^[52],对海洋热储存带来非常大的影响。计算表明,北冰洋夏季上层海洋变暖足以使冬季的海冰生长减少 0.75 m ,使秋季的结冰推迟2周至2个月^[43]。

虽然海洋在不断地增暖,但海洋实际增加的热量含量并不多。海洋吸收的热量绝大多数通过湍流运动向上传输,这些热量被称为冰下海洋热通量。冰下海洋热通量有着显著的季节变化,冬季较小,在8月可以达到 $40\sim 60\text{ W/m}^2$ ^[44]。在冰间水道中,海洋热通量会通过长波辐射、感热和潜热通量直接进入大气,成为影响大气热过程的主要因素,在北极放大过程中被称为“海洋强迫”^[53]。在海冰之下,海洋热通量中只有很少部分进入海冰,并通过海冰进入大气。以往认为穿过海冰的热通量为 2 W/m^2 。后来的观测表明,这一数值被低估了近1倍^[54]。夏季到达冰下的海洋热通量远大于穿过海冰散热的热通量,导致大量热量在冰下积聚,直接造成海冰的底部融化,是海冰厚度减薄的主要因素。

海洋热通量的绝大部分能量来自太阳短波辐射,还有一部分来自海洋的热平流。海洋环流在2个方面导致海水热量的输运与再分配:一是将低纬度的暖水(太平洋水和大西洋水)运输到北冰洋;二是把北冰洋内部加热的水体重新分布,主要体现在表层环流对海洋热量的再分配。表层环流随风场变化,其细节结构还需要深入研究^[55]。通过白令海峡进入的太平洋入流,在夏季直接影响楚科奇海海冰融化,在冬季则成为保留在北极海冰之下的一个次表层海洋热源,对北冰洋太平洋扇区的海冰减退有重要贡献^[56~57]。实际上,太平洋水水层厚度只有几十米,入流流量只有 1 Sv 左右,携带的热量在融冰中很快耗尽,无法对北冰洋深处的海冰融化产生显著影响。真正影响大范围海冰的是开阔水域受到局地加热的水体,这些水体不断进入冰区加剧海冰融化^[46]。相比之下,来自弗莱姆海峡的大西洋入流水层厚度数百米,流量 5 Sv 以上,不仅深刻影响北冰洋中大西洋扇区的海冰,维系了大面积的冰间湖,而且通过对流潜沉到200 m以下,形成北极中层水,通过环极边界流输送到北冰洋各个海盆^[58,59]。北冰洋海盆区北极中层水的热量被盐跃层抑制不能上传,但在北冰洋边缘海域存在上升流,将暖水带到近表层海域,导致加拿大海盆外围的海冰大范围融化^[60]。

大西洋亚极地海区的强对流是全球热盐环流的主要动力^[61],而北冰洋淡水含量变化是影响该海区对流和层化过程的重要因素。Proshutinsky等^[62]首次开展了针对北冰洋淡水含量的研究,此前并未引起关注的北冰洋淡水含量变化成为近年来的研究热点^[14,63~66]。北冰洋中心海区在20世纪呈现出咸化

趋势,淡水以 $(239 \pm 270) \text{ km}^3/10\text{a}$ 的速度减少^[63]。但在20世纪末以来,淡水含量呈显著增加态势^[64]。到2010年,加拿大海盆淡水含量接近 $45\ 800 \text{ km}^3$,约占北冰洋淡水总量的60%,是北冰洋淡水的主要分布区域。研究发现^[67],除2006年以外,2003—2008年夏季加拿大海盆淡水含量每年增加1 m以上厚度。夏季太平洋水的盐度范围已从1993年的30~32变化为2008年的28~32^[50]。淡水含量的变化引起海面动力地形的改变,进而引起了环流的调整,改变着波弗特流流的流型和密度结构^[68]。加拿大海盆中的淡水通过弗拉姆海峡和加拿大北极群岛进入北大西洋,引起了表面盐度降低和层化加强^[14],成为影响北欧海和北大西洋对过程以及全球海洋经向翻转环流的重要因素^[61,64]。

北冰洋常年存在的主盐跃层被称为永久性盐跃层。在北冰洋的中央区,特别是阿蒙森海盆和马可罗夫海盆,盐跃层的上部表现为温度保持在冰点附近,而盐度随深度显著增加的特殊温盐结构特征,被称为冷盐跃层^[69]。冷盐跃层的形成和变化一直是北冰洋研究的热点^[70,71]。在2000年前后,马可罗夫海盆的冷盐跃层经历了从消退到恢复的特殊变化^[72,73],引起了广泛的关注。在加拿大海盆,由于太平洋水的汇入,盐跃层结构不同于冷盐跃层^[72,74],而是表现为双跃层结构^[75]。近年的观测资料显示,在北冰洋次表层海水中还存在一个季节性盐跃层。夏季,随着海冰的消融,在20 m附近会出现一个低温低盐的盐跃层;秋季过后,该盐跃层会慢慢消失。这个次表层盐跃层是次表层暖水发生的必要条件^[48]。由于北冰洋存在多重的盐度跃层,每个盐跃层都会对垂直方向的热量传输起到抑制作用,下层的热量上不来,上层的热量下不去。因此,北冰洋有气候效应的水体实际上只有几十米厚。

北极的变化以海冰变化为主要特征,海洋的作用不那么直观。然而,海洋才是北极变化获取能量的关键因素,是太阳能的转换器和储存器。北极海洋的变化还有很多问题没有搞清楚,如北极上层海洋的温盐结构如何影响对太阳辐射的吸收?海洋内部能量如何在上层海洋中均匀化?海洋的能量如何在融冰和向大气传热之间进行分配?海洋储存的热量如何调控秋季的对流,延缓海冰的冻结?这些海洋过程对北极海冰变化是至关重要的,需要深入研究北极海冰减退引起的上层海洋热储存增加,北冰洋夏季热量储存的延迟释放及其对海冰的影响,北冰洋上层环流引起的热量平流输送与分配,北极上

升流引起的中层水热量垂向输送,极地淡水含量的变化对海洋层化及动力高度变化的影响,北冰洋盐跃层结构变化及其对热量储存和转换的影响。

3 北极正在发生的气候和天气变化

在过去30余年,北极的气温呈现持续增暖的趋势,21世纪以来北极的增暖幅度约为全球平均值的2倍,被称为“北极放大”现象。北极增暖的关键问题是热量从何而来。由于近年来太阳活动没有明显异常,北极增暖不是由地球之外的因素引起的,只能来源于地球系统内部。人们最早想到了可能是低纬度更多的热量进入了北极地区。然而,多年的观测结果表明,来自低纬度的热量确有变化,但对北极增暖的贡献不明显^[76]。因而,北极增暖的热量主要来自北极自身额外获得的能量。在太阳辐射强度基本保持不变的前提下,北极能量的增加与气候系统中的正反馈过程相联系。人们研究了各种可能的反馈过程,主要是冰雪反照率反馈(snow/ice-albedo feedback)、水汽反馈(water vapor feedback)和云辐射反馈(cloud-radiation feedback)3种。研究表明,水汽的作用并不构成正反馈,因为冰面的水汽总是处于饱和状态^[77,78]。云是直接影响太阳辐射的因素,其反馈作用最令人关注。云的反馈是很多反馈的组合,包括云分布、云中水含量、液滴大小、云温度、降雨、相变等多种过程引起的反馈^[78]。1982—1999年卫星遥感得到的云数据表明,北极春季和夏季云量增大,而冬季云量减小^[79,80]。但是总体来看,云的变化并不是引起海冰减少的主要因素^[81]。研究表明,北极增暖的反馈主要是冰雪反照率反馈,即海冰减少导致海洋吸收热量的增加,这些热量释放给大气,引起气温增加。后来将这种反馈更为准确地称为海冰—气温反馈(ice-temperature feedback)。

北极气温升高同时引起大气环流的复杂变化,通过对海面气压场(Sea Level Pressure, SLP)时间序列数据进行EOF分析,可以得到AO的空间分布和时间系数,后者称为北极涛动指数(Arctic Oscillation Index, AOI)。由于北极变暖,北极涛动的强度也显著下降,AOI在最近10年呈现弱的负位相。Zhao等^[82]研究了北极涛动的空间变化,确定了北极涛动的空间变化指数。结果表明,1950年以来的北极涛动空间变化大体可分为3个阶段:1950—1970年是正位相阶段,代表全球变暖以前的情形;1970—1998年是负位相阶段,大体代表全球变暖但北极没有明显变暖的情形。1998年至今是正负位相不明显的

阶段,代表北极变暖的阶段,表明北极涛动的影响范围变小。这段时间 AO 与北极海冰的变化趋势并不一致,二者之间的关系表现出明显的“退耦(decoupled)”现象^[18]。

北极上空大气环流异常的优势模态除 AO 外,还存在偶极子型(Dipole Anomaly, DA^[83])的东西半球振荡。最近的研究结果表明,2007 年北极海冰急剧减少后 AO 的响应越来越弱,且更偏向于出现负位相,海冰与大气的耦合关系更多地体现在与 DA 的耦合相关上^[84]。Liu 等^[85]的研究表明,最近几年北极海冰快速减少引起的大气环流异常响应并不是传统的 AO 模态,也不是稳定的 DA 模态,而是一种更为复杂的大气环流异常型,导致了近年来北半球极端降雪和严寒频发,但其复杂的影响途径仍需进一步的深入研究。近几十年, AO/NAO 向负位相的转变表征了对流层西风带的减弱,这种大气环流的变化可以引起北半球大陆的变冷^[8, 86]。大气环流主要模态的空间形态变化也会引起陆地变冷^[6, 87]。研究表明,北极放大效应可加强大气环流的这些变化^[88-91]。

在北极增暖背景下,不仅大气环流发生异常,中尺度的气旋活动风暴轴向北移动^[92-94],中纬度地区进入北极地区的气旋频率和强度增强,北极地区生成的气旋活动频率和强度也有增强的趋势^[93, 95]。北极气旋活动的增强导致海冰迅速减少,引发更强烈的风暴潮^[96]。

对大气而言,海洋的作用无比重要,是大气变化的主要能量来源,北极气候的变化机制被称为海洋强迫。在海洋强迫下,需要解决的科学问题很多,最重要的关键问题有:北极海冰快速减退条件下的气—冰—海耦合过程,海洋强迫对北极放大正反馈机制的贡献,北极天气尺度系统变化及其在北极放大过程中的作用,北极云雾对北极放大的负反馈作用。通过相关的研究,才能深入认识北极海—冰—气系统正在发生的变化。

4 北极变化对北半球和中国气候的影响

北极气候的变化导致了北极能量新的平衡,北极作为寒极的性质发生了重大变化,受到影响的不仅是北极地区,而且对中纬度地区产生巨大影响,主要体现在风暴路径以及行星波及其能量传播^[97, 98]。已有研究表明,北半球大气环流对北极海冰异常的响应存在直接和间接 2 种^[99]。直接响应主要是北极局地的响应,引起春季积雪的减少并导致海冰减

退^[100]。北极海冰对中国气候的影响可以通过大气环流异常的间接响应来实现。

经过多年的资料收集和思索,Overland 等^[6]提出了北极变化与全球变化相互影响的机理,认为全球变暖启动了北极海冰的减少,进而发生海洋吸收热量增加和加热大气的正反馈过程,反过来影响全球变暖过程。具体而言,中高纬度大气罗斯贝波理论可以解释北极对中纬度影响的机制。随着北极变暖海冰融化,北极放大效应最主要的一个表现是北极寒极的变暖,热带与极区温差减小,导致罗斯贝波加深(振幅增大)和带状风减弱,进而引起罗斯贝波传播速度减慢,使得中纬度天气系统持续时间更长,造成中纬度极端天气事件增多,干旱、热浪、严寒等更为严重^[91, 101, 102]。罗斯贝波加深的最常见表现就是大气阻塞高压或西风槽的发展和加强。关于罗斯贝波的加深机理,以往的研究中主要有大气内部动力过程和非绝热加热等外部强迫 2 种观点,其中大气内部动力过程主要包括波流相互作用^[103]、共振理论^[104]、多平衡态理论^[105]、非线性孤立波理论^[106]、偶极子理论^[107]、天气尺度涡旋的激发^[108]以及天气尺度波与行星尺度波的非线性相互作用理论^[109]等几种理论,但这些理论基本上都是基于准地转近似理论框架,对于极区的强非线性效应的贡献考虑不足。由于极区地球自转效应增强,极区的涡旋特征类似于台风外围涡旋罗斯贝波^[110]的效应。因此,建立合适的极区非线性动力学模型来研究罗斯贝波加深的机理是一项不可或缺的工作。

我国学者指出 AO/NAO 能通过影响西伯利亚高压进而影响东亚冬季风^[111, 112],表明北极海冰快速消融后北半球中高纬度大气环流的异常响应已由原来的纬向型(0 波结构的 AO)向较高频的经向型(DA 为 1 波定常波结构)过渡,大气优势模态对北极放大的响应表现出更复杂的异常环流型^[83, 85, 87],大气对极区这种异常加热的响应可能会产生高纬度定常波的响应^[112, 113],可以向南形成几支稳定的气流通道引导冷空气南下,进而影响中纬度地区的气候变化。

通过大气再分析资料分析、海表温度资料分析以及大气环流数值模拟发现,北极秋季海冰减少可以引起高纬高压系统的发展,甚至有利于阻塞高压的发展与维持^[114, 115],这一机制可能是中国 2008 年 1~2 月出现严重的持续性冻雨的主要原因。在北极放大的背景下,欧亚大陆反气旋活动强度出现了明显的增强趋势,反气旋强度变化与欧亚中纬度地

区的极端温度事件日数存在显著相关,其中与东亚特别是我国东部地区关系尤为明显^[116]。

我国大部分地区位于中纬度气候带,气候系统深受北极过程的影响。遥远的北极海冰的异常变化如何影响中国的气候变化,目前仍然是一个需要深入研究的问题。我们认为,北极影响我国气候的因素事实上是环球罗斯贝波的变异问题,不仅与北极问题有关,也与热带过程有关;不仅与中国过程有关,也与欧洲和北美的问题有关。北极变化对我国气候和天气的影响机理还很不清楚,需要深入研究大气对极区异常加热外强迫的定常波响应特征、极区涡旋罗斯贝波的动力特征及其在中高纬度罗斯贝波加深过程中的作用、高纬度罗斯贝波加深的非线性机理、北极放大过程对北极涛动长期变化的影响等。通过对这些过程的认识,搞清北极变化对我国气候变化和相关灾害性天气事件的影响方式。

5 讨论

当北极快速变化展现在人们面前的时候,科学界受到极大的震撼,所有的科学家都没有预测出北极的快速变化,所有的模式都没有能模拟出海冰的快速减退。人们发现,对北极海冰、海洋和大气过程的理解还没有真正深入到海冰变化的物理实质。最近5年的时间里,一些科学家反思了北极研究的现状和问题,认为还是应该从大的科学问题着眼,从具体的物理过程入手,重新认识变化了的北极。科学界将北极海冰变化的原因归结于全球气候变化和在北极发生的各种正反馈,认为是这些正反馈导致海洋吸收了更多的热量,加强了气—冰—海之间的相互作用,引起海冰的进一步减退。已有的研究表明,这种研究思路是正确的。然而认识这些正反馈却并不容易,因为北极发生的主要正反馈都涉及到海洋和海冰变化的物理过程,而这些过程的大部分并没有搞清楚,甚至知之甚少。因此,近年来关于北极变化正反馈的研究进展并不大。在深入研究北极发生的物理过程,尤其要研究北极变暖之后各种变性的物理过程和新产生的物理过程,探索北极变化的物理实质。研究基础的物理过程,只靠同化数据和再分析数据是不够的,需要有针对性地开展大规模现场观测,获得北极变化过程的实测数据,才能真正反映和认识这些物理过程。

与此同时,北极变化对我国气候的影响也逐步显现。已有的研究表明,在冬季,北极的变化通过大气环流影响我国北方的气候。我国北方冬季普遍增

暖和极端严寒天气都与北极的作用密不可分。北极变化改变了大气环流,对沙尘和雾霾的输送方向产生重要影响^[117]。春季和秋季是冷暖气团消长时期,通常与锋区的活动和北方的干旱过程相联系。初步研究表明,我国2008年和2011年南方的大规模冻雨与北极海冰的变化密切相关,而且同时发生的北方干旱导致华北主要产粮区冬小麦大幅度减产。北极的可能影响还有很多,如对海上风暴、夏季酷热、秋季降雪的影响等,其中大部分尚未充分研究。

北极对我国气候的影响会产生重大的社会影响。首先是对主要产粮区气候的影响,直接威胁到我国的粮食安全。其次是气候灾害的发生,对全国产生多种可能的灾害。对北极变化的深入研究是推动北极变化对我国气候影响研究的主要渠道,攻克一系列尚未解决的科学问题,为解决北极影响我国的过程和机理、提高气候预测精度和水平奠定坚实的基础,支持国家有关部门提出切实的措施和必要的对策,应对北极变化对我国气候的强烈影响。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] Pachauri R K, Allen M R, Barros V R, et al. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014: 151.
- [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] Holland M M, Bitz C M, Tremblay B. Future abrupt reductions in the summer Arctic sea ice [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(23), doi: 10.1029/2006GL028024.
- [5] Kumar A, Perlwitz J, Eischeid J, et al. Contribution of sea ice loss to Arctic amplification [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(21), doi: 10.1029/2010GL045022.
- [6] Overland J E, Wood K R, Wang M. Warm Arctic-cold continents: Climate impacts of the newly open Arctic Sea [J]. *Polar Research*, 2011, 30, doi: 10.3402/polar.v30i0.15787.
- [7] Lenton T M. Arctic climate tipping points [J]. *Ambio*, 2012, 41(1): 10-22.
- [8] 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), doi: 10.1029/2007gl032023.
- [9] Wadhams P. Arctic ice cover, ice thickness and tipping points [J]. *Ambio*, 2012, 41(1): 23-33.
- [10] Comiso J C. A rapidly declining perennial sea ice cover in the

- Arctic[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(20): 17-41-17-44, doi: 10.1029/2002GL015650.
- [11] Meier W N, Stroeve J, Fetterer F. Whither Arctic sea ice? A clear signal of decline regionally, seasonally and extending beyond the satellite record [J]. *Annals of Glaciology*, 2007, 46(1): 428-434.
- [12] Stroeve J, Holland M M, Meier W, et al. Arctic sea ice decline: Faster than forecast [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(9), doi: 10.1029/2007GL029703.
- [13] 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), doi: 10.1029/2007GL031972.
- [14] 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), doi: 10.1029/2007GL032043.
- [15] 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: Oceans*, 2009, 114(C7), doi: 10.1029/2009jc005312.
- [16] Wadhams P, Hughes N, Rodrigues J. Arctic sea ice thickness characteristics in winter 2004 and 2007 from submarine sonar transects [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C8), doi: 10.1029/2011jc006982.
- [17] Perovich D K, Richter-Menge J A, Jones K F, et al. Sunlight, water, and ice: Extreme Arctic sea ice melt during the summer of 2007 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(11): L11501, doi: 10.1029/2008GL034007.
- [18] Zhang J, 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), doi: 10.1029/2008gl034005.
- [19] Kinnard C, Zdanowicz C M, Fisher D A, et al. Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1450 years [J]. *Nature*, 2011, 479(7374): 509-512.
- [20] Wang M, Overland J E. A sea ice free summer Arctic within 30 years? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(7), doi: 10.1029/2009gl037820.
- [21] Koenigk T, Brodeau L, Graversen R G, et al. Arctic climate change in 21st century CMIP5 simulations with EC-Earth [J]. *Climate Dynamics*, 2013, 40(11/12): 2719-2743.
- [22] Liu J, Song M, Horton R M, et al. Reducing spread in climate model projections of a September ice-free Arctic [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(31): 12571-12576.
- [23] Hunke E, Notz D, Turner A, et al. The multiphase physics of sea ice: A review for model developers [J]. *The Cryosphere*, 2011, 5(4): 989-1009.
- [24] Zhang S, Zhao J, Shi J, et al. Surface heat budget and solar radiation allocation at a melt pond during summer in the central Arctic Ocean [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2014, 13(1): 45-50.
- [25] Polashenski C, Perovich D, Courville Z. The mechanisms of sea ice melt pond formation and evolution [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C1), doi: 10.1029/2011jc007231.
- [26] Perovich D K, Richter-Menge J A. Loss of sea ice in the arctic [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1: 417-441.
- [27] Serreze M C, Barry R G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis [J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 77(1): 85-96.
- [28] Holland M M, Bailey D A, Briegleb B P, et al. Improved sea ice shortwave radiation physics in CCSM4: The impact of melt ponds and aerosols on Arctic sea ice [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(5): 1413-1430.
- [29] Hopkins M A, Thorndike A S. Floe formation in Arctic sea ice [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, 111(C11), doi: 10.1029/2005JC003352.
- [30] Webster M A, Rigor I G, Nghiem S V, et al. Interdecadal changes in snow depth on Arctic sea ice [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(8): 5395-5406.
- [31] Wu Yang, Zhang Jiahua, Xu Haiming, et al. Advances in study of snow cover from remote sensing data [J]. *Meteorologic Monthly*, 2007, 33(6): 3-10. [吴杨, 张佳华, 徐海明, 等. 卫星反演积雪信息的研究进展 [J]. *气象*, 2007, 33(6): 3-10.]
- [32] Comiso J C, Cavalieri D J, Markus T. Sea ice concentration, ice temperature, and snow depth using AMSR-E data [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2003, 41(2): 243-252.
- [33] Markus T, Cavalieri D J. Snow depth distribution over sea ice in the southern ocean from satellite passive microwave data [M]// Jeffries M O, ed. *Antarctic Sea Ice: Physical Processes, Interactions and Variability*. Washington DC: American Geophysical Union, 2013: 19-39.
- [34] Worby A P, Markus T, Steer A D, et al. Evaluation of AMSR-E snow depth product over East Antarctic sea ice using in situ measurements and aerial photography [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C5), doi: 10.1029/2007jc004181.
- [35] Hakkinen S, Proshutinsky A, Ashik I. Sea ice drift in the Arctic since the 1950s [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(19), doi: 10.1029/2008gl034791.
- [36] Rampal P, Weiss J, Marsan D. Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979-2007 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C5), doi: 10.1029/2008jc005066.
- [37] Spreen G, Kwok R, Menemenlis D. Trends in Arctic sea ice drift and role of wind forcing: 1992-2009 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(19), doi: 10.1029/2011gl048970.
- [38] Wang X, Zhao J. Seasonal and inter-annual variations of the primary types of the Arctic sea-ice drifting patterns [J]. *Advances in Polar Science*, 2012, 23: 72-81.
- [39] Massonnet F, Goosse H, Fichefet T, et al. Calibration of sea ice dynamic parameters in an ocean-sea ice model using an ensemble Kalman filter [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(7): 4168-4184.
- [40] Steele M, Morison J, Ermold W, et al. Circulation of summer

- Pacific halocline water in the Arctic Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109 (C2), doi: 10. 1029/2003jc002009.
- [41] Perovich D K, Light B, Eicken H, *et al.* Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979–2005: Attribution and role in the ice–albedo feedback [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(19): L19505, doi: 10. 1029/2007GL031480.
- [42] Steele M, Zhang J, Ermold W. Mechanisms of summertime upper Arctic Ocean warming and the effect on sea ice melt [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 2010, 115(C11), doi: 10. 1029/2009jc005849.
- [43] Steele M, Ermold W, Zhang J. Arctic Ocean surface warming trends over the past 100 years [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2), doi: 10. 1029/2007gl031651.
- [44] Maykut G, McPhee M G. Solar heating of the Arctic mixed layer [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 1995, 100(C12): 24 691–24 703.
- [45] Lique C, Steele M. Seasonal to decadal variability of Arctic Ocean heat content: A model-based analysis and implications for autonomous observing systems [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(4): 1 673–1 695.
- [46] Zhao Jinping, Shi Jiuxin, Jiao Yutian. Temperature and salinity structures in summer marginal ice zone of Arctic Ocean and an analytical study on their thermodynamics [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica* 2003, 34: 375–388. [赵进平, 史久新, 矫玉田. 夏季北冰洋海冰边缘区海水温盐结构及其形成机理的理论研究[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34: 375–388.]
- [47] Chen Zhihua, Zhao Jinping. The thermodynamics of subsurface warm water in the Arctic Ocean [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica* 2010 (2): 167–174. [陈志华, 赵进平. 北冰洋次表层暖水形成机制的研究 [J]. 海洋与湖沼, 2010, (2): 167–174.]
- [48] Cao Yong, Zhao Jinping. Study on the fine structure of near surface temperature maximum in the Canada Basin in 2008 [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 33(2): 11–19. [曹勇, 赵进平. 2008 年加拿大海盆次表层暖水的精细结构的研究 [J]. 海洋学报, 2011, 33(2): 11–19.]
- [49] Jackson J, Carmack E, McLaughlin F, *et al.* Identification, characterization, and change of the near-surface temperature maximum in the Canada Basin, 1993–2008 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115 (C5), doi: 10. 1029/2009JC005265.
- [50] Jackson J M, Allen S E, McLaughlin F A, *et al.* Changes to the near-surface waters in the Canada Basin, Arctic Ocean from 1993–2009: A basin in transition [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116 (C10), doi: 10. 1029/2011jc007069.
- [51] Markus T, Stroeve J C, Miller J. Recent changes in Arctic sea ice melt onset, freezeup, and melt season length [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C12), doi: 10. 1029/2009jc005436.
- [52] Kinnard C, Zdanowicz C M, Koerner R M, *et al.* A changing Arctic seasonal ice zone: Observations from 1870–2003 and possible oceanographic consequences [J]. *Geophysical Research Letters* 2008, 35(2), doi: 10. 1029/2007GL032507.
- [53] Haynes J E. Understanding the Importance of Oceanic Forcing on Sea Ice Variability [D]. Monterey CA: Naval Postgraduate School, 2010.
- [54] Krishfield R A, Perovich D K. Spatial and temporal variability of oceanic heat flux to the Arctic ice pack [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110 (C7), doi: 10. 1029/2004JC002293.
- [55] Zhao J, Wang W, Kang S H, *et al.* Optical properties in wsectators around the Mendeleev ridge related to the physical features of water masses [J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, doi: 10. 1016/j. dsr2. 2015. 04. 011.
- [56] Shimada K, Kamoshida T, Itoh M, *et al.* Pacific ocean inflow: Influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33 (8): L08605, doi: 10. 1029/2005GL025624.
- [57] Woodgate R A, Weingartner T, Lindsay R. The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea-ice retreat [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37 (1), doi: 10. 1029/2009GL041621.
- [58] Rudels B, Friedrich H J, Quadfasel D. The Arctic circumpolar boundary current [J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1999, 46(6): 1 023–1 062.
- [59] Zhao Jinping, Shi Jiuxin. Research progresses and main scientific issues in studies for Arctic circumpolar boundary current [J]. *Chinese Journal of Polar Science*, 2004, 16(3): 159–169. [赵进平, 史久新. 北极环极边界流研究及其主要科学问题 [J]. 极地研究, 2004, 16(3): 159–169.]
- [60] Woodgate R A, Aagaard K, Swift J H, *et al.* Atlantic water circulation over the Mendeleev Ridge and Chukchi Borderland from thermohaline intrusions and water mass properties [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 2007, 112(C2), doi: 10. 1029/2005JC003416.
- [61] Shao Qiuli, Zhao Jinping. On the deep water of the Nordic Seas [J]. *Advances in Earth Science* 2014, 29(1): 42–55. [邵秋丽, 赵进平. 北欧海深层水的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 42–55.]
- [62] Proshutinsky A Y, Johnson M A. Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*(1978–2012), 1997, 102(C6): 12 493–12 514.
- [63] Polyakov I V, Alexeev V, Belchansky G, *et al.* Arctic Ocean freshwater changes over the past 100 years and their causes [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(2): 364–384.
- [64] McPhee M, Proshutinsky A, Morison J H, *et al.* Rapid change in freshwater content of the Arctic Ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36 (10): L10602, doi: 10. 1029/2009GL037525.
- [65] Rabe B, Karcher M, Schauer U, *et al.* An assessment of Arctic Ocean freshwater content changes from the 1990s to the 2006–2008 period [J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Re-*

- search Papers, 2011, 58(2): 173-185.
- [66] Spall M A. On the circulation of Atlantic water in the Arctic Ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2013, 43(11): 2352-2371.
- [67] Guo Guijun, Shi Jiuxin, Zhao Jinping *et al.* Summer freshwater content variability of the upper ocean in Canada Basin during recent sea ice rapid decline[J]. *Chinese Journal of Polar Science*, 2012, 24(1): 35-46. [郭桂军, 史久新, 赵进平, 等. 北极海冰快速减少期间加拿大海盆上层海洋夏季淡水含量变化[J]. *极地研究*, 2012, 24(1): 35-46.]
- [68] Zhong W, Zhao J. Deepening of the atlantic water core in the Canada Basin in 2003-11[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2014, 44(9): 2353-2369.
- [69] Aagaard K, Coachman L, Carmack E. On the halocline of the Arctic Ocean[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1981, 28(6): 529-545.
- [70] Rudels B, Anderson L, Jones E. Formation and evolution of the surface mixed layer and halocline of the Arctic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*(1978-2012), 1996, 101(C4): 8807-8821.
- [71] Shi Jiuxin, Zhao Jinping. Advances in studies on the Arctic halocline[J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(3): 351-357. [史久新, 赵进平. 北冰洋盐跃层研究进展[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(3): 351-357.]
- [72] Steele M, Boyd T. Retreat of the cold halocline layer in the Arctic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C5): 10419-10435.
- [73] Boyd T J, Steele M, Muench R D, *et al.* Partial recovery of the Arctic Ocean halocline[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(14): 2124-2124, doi: 10.1029/2001gl014047.
- [74] Shimada K, Itoh M, Nishino S, *et al.* Halocline structure in the Canada Basin of the Arctic Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(3), doi: 10.1029/2004gl021358.
- [75] Shi J, Zhao J, Li S, *et al.* A double-halocline structure in the Canada Basin of the Arctic Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 24(6): 25-35.
- [76] Yang X Y, Fyfe J C, Flato G M. The role of poleward energy transport in Arctic temperature evolution[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(14), doi: 10.1029/2010gl043934.
- [77] Serreze M C, Rehder M C, Barry R G, *et al.* The distribution and transport of atmospheric water vapour over the Arctic Basin[J]. *International Journal of Climatology*, 1995, 15(7): 709-727.
- [78] Curry J A, Schramm J L, Rossow W B, *et al.* Overview of Arctic cloud and radiation characteristics[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(8): 1731-1764.
- [79] Wang X, Key J R. Recent trends in Arctic surface, cloud, and radiation properties from space[J]. *Science*, 2003, 299(5613): 1725-1728.
- [80] Wang X, Key J R. Arctic surface, cloud, and radiation properties based on the AVHRR Polar Pathfinder dataset. Part II: Recent trends[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(14): 2575-2593.
- [81] Kay J E, Gettelman A. Cloud influence on and response to seasonal Arctic sea ice loss[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D18), doi: 10.1029/2009jd011773.
- [82] Zhao J, Cao Y, Shi J. Spatial variation of the Arctic Oscillation and its long-term change[J]. *Tellus A*, 2010, 62(5): 661-672.
- [83] Wang J, Zhang J, 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), doi: 10.1029/2008gl036706.
- [84] Fan Tingting, Huang Fei, Su Jie. The seasonal march of dominant mode of the mid-high latitude atmosphere circulation in northern hemisphere and the associated arctic sea ice[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(7/8): 19-25. [樊婷婷, 黄菲, 苏洁. 北半球中高纬度大气环流主模态的季节演变及其与北极海冰变化的联系[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2012, 42(7/8): 19-25.]
- [85] Liu J, Curry J A, Wang H, *et al.* Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(11): 4074-4079.
- [86] Overland J E, Wang M. The Arctic climate paradox: The recent decrease of the Arctic Oscillation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(6), doi: 10.1029/2004gl021752.
- [87] Zhang X, Sorteberg A, Zhang J, *et al.* Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(22), doi: 10.1029/2008GL035607.
- [88] Honda M, Inoue J, Yamane S. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(8), doi: 10.1029/2008gl037079.
- [89] Petoukhov V, Semenov V A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*(1984-2012), 2010, 115(D21), doi: 10.1029/2009JD013568.
- [90] Blüthgen J, Gerdes R, Werner M. Atmospheric response to the extreme Arctic sea ice conditions in 2007[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(2), doi: 10.1029/2011GL050486.
- [91] Francis J A, Vavrus S J. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(6), doi: 10.1029/2012gl051000.
- [92] 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.
- [93] Zhang X, Walsh J E, Zhang J, *et al.* Climatology and interannual variability of Arctic cyclone activity: 1948-2002[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(12): 2300-2317.
- [94] Wang X L, Swail V R, Zwiers F W. Climatology and changes of extratropical cyclone activity: Comparison of ERA-40 with NCEP-NCAR reanalysis for 1958-2001[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(13): 3145-3166.
- [95] Sepp M, Jaagus J. Changes in the activity and tracks of Arctic cyclones[J]. *Climatic Change*, 2011, 105(3/4): 577-595.

- [96] Vermaire J C , Pisaric M F , Thienpont J R , *et al.* Arctic climate warming and sea ice declines lead to increased storm surge activity [J]. *Geophysical Research Letters* , 2013 , 40 (7) : 1 386-1 390.
- [97] Screen J A , Simmonds I. Exploring links between Arctic amplification and mid-latitude weather [J]. *Geophysical Research Letters* , 2013 , 40 (5) : 959-964 , doi: 10. 1002/grl. 50174.
- [98] Cohen J , Screen J A , Furtado J C , *et al.* Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather [J]. *Nature Geoscience* , 2014 , 7 (9) : 627-637 , doi: 10. 1038/ngeo2234.
- [99] Deser C , Magnusdottir G , Saravanan R , *et al.* The effects of North Atlantic SST and sea ice anomalies on the winter circulation in CCM3. Part II: Direct and indirect components of the response [J]. *Journal of Climate* , 2004 , 17 (5) : 877-889.
- [100] Matsumura S , Zhang X , Yamazaki K. Summer Arctic atmospheric circulation response to spring Eurasian snow cover and its possible linkage to accelerated sea ice decrease [J]. *Journal of Climate* , 2014 , 27 (17) : 6 551-6 558 , doi: http: // dx. doi. org/10. 1175/JCLI-D-13-00549. 1.
- [101] Screen J A , Simmonds I. Amplified mid-latitude planetary waves favour particular regional weather extremes [J]. *Nature Climate Change* , 2014 , 4 (8) : 704-709 , doi: 10. 1038/nclimate2271.
- [102] Francis J A , Vavrus S J. Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming [J]. *Environmental Research Letters* , 2015 , 10 (1) , doi: 10. 1088/1748-9326/10/1/014005.
- [103] Hoskins B J , James I N , White G H. The shape , propagation and mean-flow interaction of large-scale weather systems [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences* , 1983 , 40 (7) : 1 595-1 612.
- [104] Tung K K , Lindzen R. A theory of stationary long waves. Part I: A simple theory of blocking [J]. *Monthly Weather Review* , 1979 , 107 (6) : 714-734.
- [105] Charney J G , DeVore J G. Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences* , 1979 , 36 (7) : 1 205-1 216.
- [106] Long R R. Solitary waves in the westerlies [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences* , 1964 , 21 (2) : 197-200.
- [107] Haines K , Marshall J. Eddy-forced coherent structures as a prototype of atmospheric blocking [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* , 1987 , 113 (476) : 681-704.
- [108] Shutts G. A case study of eddy forcing during an Atlantic blocking episode [J]. *Advances in Geophysics* , 1986 , 29: 135-162.
- [109] Luo D. A barotropic envelope Rossby soliton model for block-eddy interaction. Part IV: Block activity and its linkage with a sheared environment [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences* , 2005 , 62 (11) : 3 860-3 884.
- [110] Montgomery M T , Kallenbach R J. A theory for vortex Rossby-waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* , 1997 , 123 (538) : 435-465.
- [111] Wu B , Wang J. Possible impacts of winter Arctic Oscillation on Siberian High , the East Asian winter monsoon and sea-ice extent [J]. *Advances in Atmospheric Sciences* 2002 , 19 (2) : 297-320.
- [112] Wu B , Zhang R , Wang B. On the association between spring Arctic sea ice concentration and Chinese summer rainfall: A further study [J]. *Advances in Atmospheric Sciences* 2009 , 26 (4) : 666-678 , doi: 10. 1007/s00376-009-9009-3.
- [113] Wu B , Su J , Zhang R. Effects of autumn-winter Arctic sea ice on winter Siberian High [J]. *Chinese Science Bulletin* 2011 , 56 (30) : 3 220-3 228.
- [114] Wu Z , Li J , Jiang Z , *et al.* Predictable climate dynamics of abnormal East Asian winter monsoon: Once-in-a-century snowstorms in 2007/2008 winter [J]. *Climate Dynamics* , 2011 , 37 (7/8) : 1 661-1 669.
- [115] Li J , Wu Z. Importance of autumn Arctic sea ice to northern winter snowfall [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2012 , 109 (28) : E1898.
- [116] Zhang X , Lu C , Guan Z. Weakened cyclones , intensified anti-cyclones and recent extreme cold winter weather events in Eurasia [J]. *Environmental Research Letters* 2012 , 7 (4) , doi: 10. 1088/1748-9326/7/4/044044.
- [117] Wu Bingyi , Bian Lin'gen , Zhang Renhe. Effects of the winter AO and the Arctic sea ice variations on climate variation over east Asia [J]. *Chinese Journal of Polar Science* , 2004 , 16 (3) : 211-220. [武炳义 , 卞林根 , 张人禾. 冬季北极涛动和北极海冰变化对东亚气候变化的影响 [J]. *极地研究* , 2004 , 16 (3) : 211-220.]

Arctic Amplification Produced by Sea Ice Retreat and Its Global Climate Effects

Zhao Jinping¹, Shi Jiuxin¹, Wang Zhaomin², Li Zhijun³, Huang Fei¹

(1. *Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 2. *Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*; 3. *Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

Abstract: Since the 1970s, the continuous global warming has impacted the Arctic environment. The temperature increasing rate of Arctic during this century is nearly twice that of the global average, which is named as Arctic Amplification phenomena. Sea ice coverage of Arctic Ocean varied in a declined trend. Summer sea ice extent in 2012 was less than 40% of that in last century. The serious retreat of Arctic sea ice coverage is a unique phenomenon during the past 1450 years. It is projected that an ice-free summer Arctic will happen in the near future. The positive feedback processes inside the Arctic are considered to be the key factors to drive the Arctic amplification under the background of global warming, which result in the Arctic and global climate changes, and drive many extreme meteorological and climatological events. An important mission of Arctic science is to reveal the physical mechanisms that drive these positive feedbacks. The main scientific issues of Arctic amplification are all related to the air-ice-sea interaction. Sea ice is the most active factor of Arctic amplification. The variations of sea ice microstructure and the thermal dynamical features need to be clarified quantitatively by considering the melt pond, lateral melting, snow cover, and ice drifting. Ocean is the key factor to acquire and store the solar energy for Arctic change. Oceanic heat flux is very important for the energy reallocation (energy storage and release), which is influenced by fresh water content and pycnocline structure to form the air-sea coupling. The main goal of researches for the Arctic Amplification is to understand the variation of Arctic climate system, the air-ice-sea interaction, feedback between ocean and atmosphere, variation in cyclones and blocks, influence of cloud and fog on Arctic change. On the basis of better understanding of variation of sea ice, ocean, and climate Arctic, the dominant function and physical processes of the vortex Rossby-waves will be the main issue to reveal the gateways and processes for the influence of Arctic change on China's climate.

Key words: Arctic amplification; Ocean forcing; Sea ice; Climate change; Air-Ice-Ocean interaction.