第34卷 第3期
2019年3月

地球科学进展
ADVANCES IN EARTH SCIENCE

Vol.34 No.3
Mar.，2019

武丰民，李文铠，李伟.北极放大效应原因的研究进展[J].地球科学进展，2019，34(3)：232-242.DOI：10.11867/j.issn.1001-8166.2019.03.0232.
[Wu Fengmin，Li Wenkai，Li Wei. Causes of Arctic amplification：A review[J]. Advances in Earth Science，2019，34(3)：232-242. DOI：10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2019. 03. 0232.]

北极放大效应原因的研究进展

武丰民[1]，李文铠[2]，李 伟[2]
（1.浙江省气象科学研究所，浙江 杭州 310008；
2.南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室，江苏 南京 210044）

摘 要：近几十年来北极的增温幅度是全球平均的2倍以上，这种被称为“北极放大”的现象是全球气候变化的最显著特征之一。从北极局地气候反馈和北极外热输送2个方面总结了北极放大原因的最新进展。局地方面，海冰—反照率正反馈以及云和水汽增加导致的向下长波辐射增强是北极放大的重要原因，而较低的背景温度和相对稳定的大气层结使得温度反馈在北极为正，有利于变暖信号被放大。向极热输送方面，大气环流和洋流的输送作用对北极放大均有贡献，大西洋和太平洋海温的年代际变化和热带太平洋海温异常是驱动大气环流变化的主要原因。最后提出了尚需解决的关键问题。

关 键 词：北极放大；反馈机制；向极热输送；海温调制
中图分类号：P467；P731.15 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-8166(2019)03-0232-11

1 引 言

过去几十年来，北极是全球地表气温增暖最剧烈的地区，增温幅度高达1.2 ℃/10a，是全球平均增温幅度的2倍以上，被称为“北极放大”(Arctic Amplification)[1,2]。2015年12月至2016年2月，北极地表气温创造了有观测以来的最暖纪录，比之前最暖纪录(2011—2012年的冬季)高出0.7 ℃[3]。而这一纪录在随后2016—2017年的冬季和2017—2018年的冬季又被连续打破。与此同时，北极海冰的消融速度也是史无前例的。相比20世纪末，夏季海冰面积减少了2.0×10^6 km^{2}以上[4]，冬季海冰厚度则在过去30年中至少变薄了1.75 m[5]，更多稳定的多年冰转变成了季节性的一年冰[6]。

北极在全球气候系统中发挥着重要的“指示”和“记忆”作用，而且是全球气候变化的重要触发点[7]。北极气候变化可以引发一系列气候响应。研究表明，近期北半球中纬度的低温[8,9]、降水[10~12]以及大尺度环流异常[13,14]都与北极的气候变化密切相关。明确北极放大的驱动机制，不仅是气候变化理论研究的需要，对气候预测也具有重要意义。所以北极放大的原因是近期备受瞩目的焦点问题。

许多研究认为海冰消融是北极放大的关键驱动因子[1,15~19]。高反照率海冰变成开阔水面，导致海洋在夏季可以吸收更多热量并在秋冬季释放到大气中，造成近地面气温升高。气温升高又会使海冰更少，从而形成海冰—反照率正反馈，这可以使北极的增暖信号被放大。然而，也有许多研究者指出海冰—反照率正反馈机制还远不能解释近年来的北极增温[20]，温度反馈[21]、云和水汽的作用[22]也非常关键。此外，除了北极局地的强迫和反馈，北极以外的热量输送以及驱动这些输送的内在机制也受到越来越多的关注[23~25]。

北极放大的驱动机制极为复杂，还没有形成明确结论。但近期，尤其是最近几年的一些最新成果

收稿日期：2018-12-02；**修回日期**：2019-02-20.
作者简介：武丰民(1986-)，男，山东肥城人，工程师，主要从事北极气候变化的机制和影响等研究.**E-mail**：fmwu_zjqks@163.com

已经为该问题提供了许多有益线索。本文将梳理该领域的最新进展,从北极局地气候反馈和北极以外的热输送2个方面总结北极放大效应的原因。在局地因素方面,重点介绍海冰—反照率反馈、温度反馈、云和水汽反馈对北极放大效应的影响;在北极以外的热输送方面,回顾了大气和海洋环流的输送,以及大西洋和太平洋海温对向极热输送的调制和驱动作用;最后提出了尚需解决的关键问题。

2　北极局地的气候反馈

气候系统对外强迫的响应大小不仅取决于强迫,而且受到各种反馈过程的影响。正反馈越强,气候对强迫越敏感[26]。由于北极独特的地理和气候环境,形成了一系列的反馈机制,这些反馈机制可以将变暖信号放大,造成北极迅速增温。下面将介绍北极局地的几个关键反馈机制及其在北极放大中的作用。

2.1　海冰—反照率正反馈

近几十年来海冰减少的幅度和速度在过去1 450年的历史中都是绝无仅有的[4],21世纪以来的短短十几年中,夏季海冰的面积减少超过2.0×10^6 km^2,在欧亚海盆东部的拉普捷夫海、喀拉海和巴伦之海等海域,无冰状态(ice-free,海冰密集度小于10%)已经从2003年的不到1个月,增长到了2015年的3个月[25]。海冰的反照率最高可达0.9,而开阔海水的反照率则仅为0.1左右[27]。海冰不仅可以反射大部分太阳辐射,而且阻断了海水与大气之间的热交换。夏季北极气温高于海温,更多海冰消融变成开阔水面,可以使海水吸收和储存更多的太阳辐射,冬季海水对近地面的加热作用随之增强,导致近地面升温。更暖的气温使得海冰进一步减少,从而形成了海冰—反照率正反馈[28]。

海冰急剧消融是近期北极放大的主要原因之一。北极放大效应主要发生在冷季(10月至次年4月)(图1),且在海冰减少显著的区域增温也最显著[17,29]。夏季的海冰减少趋势与秋季类似,但夏季北极的增温很弱,在拉普捷夫海、楚科奇海和波弗特海部分区域甚至有显著的降温趋势(图1)。在增温的垂直结构上,夏季也不像其他季节一样呈现“底部放大”特征,而是近地面的增温较弱,增温最大高度在900 hPa附近[29,30]。这主要是由于夏季北极的近地面气温比海表温度略高,感热通量的方向是从大气传向海洋。加之夏季融冰需要吸收热量,所以夏季更多的海冰融化并不能导致气温升高[29,31],而是使更多的能量储存在海水上层,这些能量在冷季释放到大气中造成北极增暖。此外,Hu等[32]还指出近期夏季北极增温不显著跟热带太平洋中部型厄尔尼诺事件增多有关。

以往的研究主要是关注海冰融化成开阔水面的影响,而对海冰变薄的影响并未引起广泛重视。这一方面是由于海冰变薄发生在冰面以下不易引起注意,另一方面则是由于缺乏海冰厚度资料。由于薄冰的反照率更低,阻断效应弱于较厚的海冰[6],而且冬季的海冰厚度是夏季海冰预报的关键因子[33],冬季海冰变薄会造成夏季融冰更快更多。所以海冰厚度对北极增温的影响也非常重要。Lang等[34]用数值模式研究了海冰厚度对北极放大的影响,结果显示在海冰密集度不变而仅使厚度变薄的情况下,北极增温依然显著,其贡献在北极放大中所占的比例可达37%。

2.2　大气温度反馈

根据普朗克定律,随着温度升高,各波段放射的能量均加大,积分辐射能力也随之迅速加大,且能量集中的波段向短波方向移动[35]。当大气受到净辐射增加的影响而增温时,向外长波辐射也随之增强,这就是普朗克反馈。这一负反馈有助于温度达到新的平衡而不是一直升高。根据普朗克定律还可以得出辐射增量与温度变化的关系,即在同等的外部辐射强迫下,绝对温度越高,为达到向外辐射能量平衡所需要的温度调整便越小,反之亦然[21,30]。比如在30 °C时,为平衡1 W/m^{2}的辐射强迫气温需要升高0.16 °C,而在−30 °C时,为平衡同样能量所需的增温则达到0.31 °C。由于极地的绝对温度明显低于中低纬地区,在同等辐射强迫下,极地需要更高的增温来达到新平衡[21]。

一般来说,空气温度随着高度升高而降低,其在垂直方向上随高度升高而降低的速率叫做温度垂直递减率。在干绝热条件下,干洁大气的温度垂直递减率约为9.6 °C/km[35]。但温度递减率在不同的气候条件下相差较大。在热带地区,对流旺盛,积云对流加热使得对流层中高层的升温明显大于低层,温度廓线更接近湿绝热递减率,这一过程也被称为“湿绝热调整”[26]。中高层的增温有助于向外长波辐射增加,减小大气层顶的辐射强迫,低层也就不需要很大的温度调整来射出长波,这便是负的“温度递减率反馈”。与热带相反,温度递减率反馈在北极为正。这是因为北极的大气层结比较稳定,垂直运动很少,低层和中高层大气的耦合很弱,增温主要被限制在低层[21,26]。

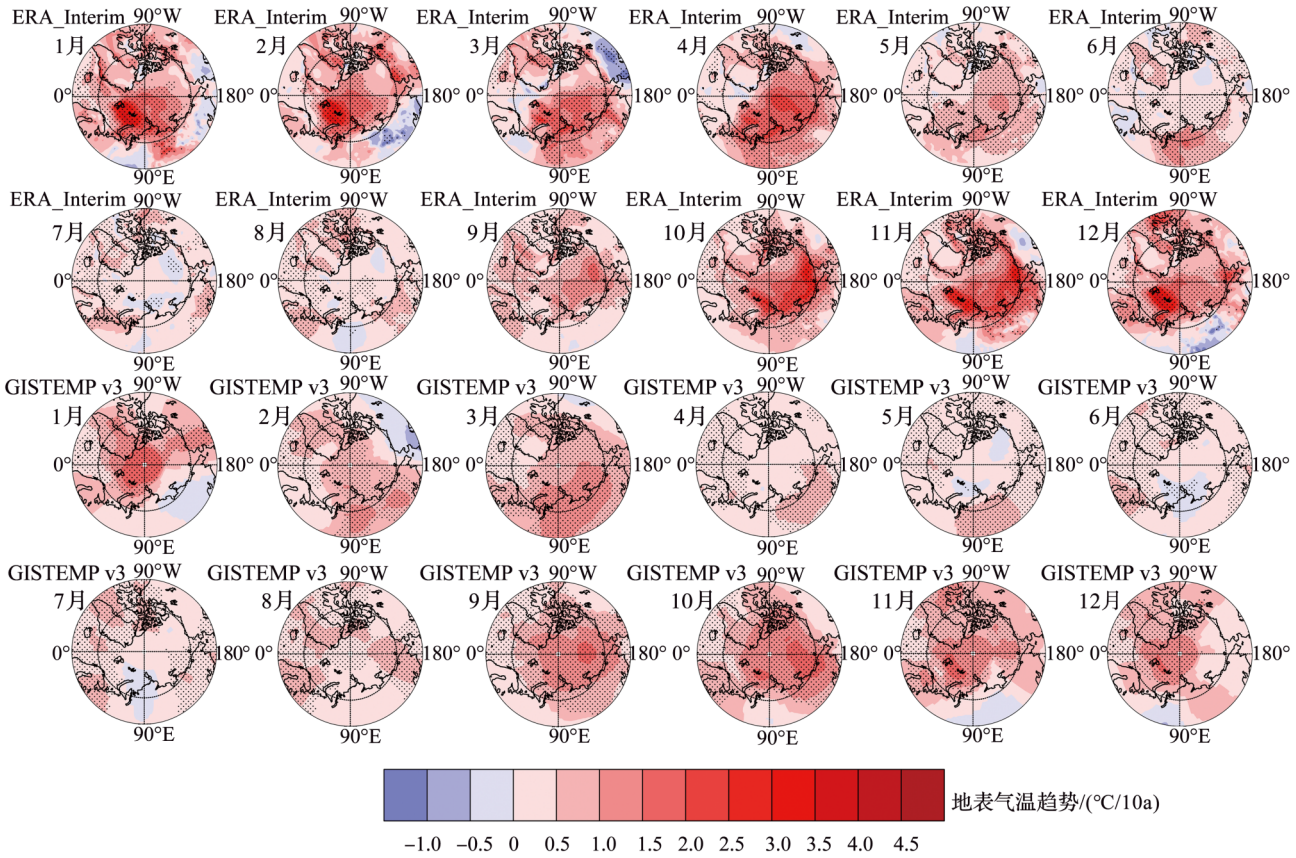


图 1　1979—2018 年北极逐月的地表气温趋势

Fig. 1　Linear trends of monthly mean Arctic 2 m air temperature over 1979-2018

黑点区域表示通过了 95% 显著性检验(t 检验),资料来自 ERA-Interim 月平均 2 m 气温(https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/)和 GISTEMP v3(http://data.giss.nasa.gov/gistemp/)

Stippling indicates trends exceeding the 95% confidence level (t test), the figuers are based on the Notes: ERA-Interim reanalysis dataset(https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets) and GISTEMP v3(http://data.giss.nasa.gov/gistemp/)

“普朗克反馈”表示均一增温与向外长波辐射增加之间的负反馈关系;而“温度垂直递减率反馈”则表示垂直方向上增温不均对向外长波辐射的贡献。二者都反映出大气或地表温度变化伴随着长波辐射的改变,统称为“大气温度反馈”[36]。“大气温度反馈”的本质是地表和大气温度变化之间的热辐射耦合[37]:大气增温导致向下长波辐射增加,地表温度随之升高,而地表增温会使向上长波辐射增加,使得大气更暖,从而形成一个增温的正反馈机制[36]。在北极地区,由于绝对温度较低,且“温度递减率反馈”为正,北极近地面的增暖信号很容易被放大。Pithan 等[21]指出,“大气温度反馈”在近年来北极放大中的作用比“海冰—反照率正反馈”更大,是北极增暖的重要原因。

2.3　云和水汽反馈

太阳辐射和热辐射位于电磁波谱的不同波段,分别为短波和长波。太阳辐射的短波可以自由穿过大气到达地表,而地表的热辐射长波在向上穿过大气时则可以被大气吸收和再放射,这种作用类似于温室的玻璃,可使温室内的温度比温室外高很多[35]。大气中对长波辐射吸收的主要气体是水汽、二氧化碳和臭氧,其中最重要、温室效应也最强的是水汽。根据湿空气状态方程 $P=\rho RT$(P 为气压,ρ 为密度,R 为气体常数,T 为温度)可知,较低的温度对应着较低的饱和水气压,极地空气对水汽的容量远小于中低纬地区[35]。温度升高导致空气对水汽的容量增加,而且会使下垫面蒸发增多,从而形成水汽正反馈。

云量的变化主要受大气水汽含量的影响,一般表现为与大气水汽含量的同步变化[38]。云量增加对温度的影响同时具有正、负 2 种效应。一方面,云和水汽可以阻挡太阳短波辐射,使向下到达地球的短波能量减少;另一方面,云和水汽增加导致大气向下长波辐射增强,大气的保温效应增强。所以云和水汽反馈导致的地表温度变化是短波效应和长波效应相互竞

争的结果[37,39]。在冬季和春季,太阳辐射很弱,北冰洋基本处于冰封状态,大部分太阳辐射都被反射。这时云和水汽增多造成的向下长波增加非常显著,而对地表接收短波辐射的影响则很小,云和水汽增多的增温效应很强。到了夏季和秋季,北极太阳辐射增强,北冰洋的开阔水面也明显增多,这时云和水汽增多导致的短波辐射减少与长波辐射增加几乎可以相互抵消,云和水汽增加对地表温度的影响较小[39]。

北极放大主要发生在海冰的非融化季[17,29],大量研究表明,云和水汽的增多是近年来北极海冰减少和北极增温的重要原因。在天气尺度上,水汽入侵事件可使北极地表气温爆发性增高,很多研究表明北极爆发性增温事件和海冰极端偏少个例都与异常水汽输送密切相关[40~42]。图 2 显示了 1999 年 12 月 27 日的一次水汽入侵事件,在短短 5 天时间内,北极大部分区域的气温增幅达 15 °C 以上。在过去 20 年,水汽入侵事件明显增多,这可以解释巴伦之海 45% 的气温升高和 30% 的海冰减少[40]。Gong 等[43]认为,云和水汽增加导致的向下红外辐射增强在最近几十年北极放大的原因中具有压倒性优势。Mortin 等[44]则指出,云和水汽增多导致的温室效应增强是触发春季融冰的原因,近年来北极春季融冰时间提前也主要与云和水汽的年代际增多有关。春季融冰提前可以在后续几个月中激发一系列正反馈,造成海冰减少和北极增暖[22,44]。水汽多少还在北极海冰和北极温度的年际变化中发挥着关键作用。如 2012 年秋季,海冰和气温都创造了截至当时的历史最低和最暖记录,而在随后的冬季,海冰迅速恢复,气温随之降低。到 2013 年夏季,海冰密集度比 2012 年同期增长了 48%,而云和水汽异常偏少正是这一剧烈年际变化的驱动机制[45]。

3　北极外的向极热输送

3.1　大气环流的作用

大气环流输送作用对北极温度的影响主要分为 2 个方面:一是将较低纬度的水汽和热量输送到北极,二是调控海冰的运动和输出。近期北极的剧烈增温与大气环流变化密切相关。

Ding 等[46]通过观测分析和数值试验证明,近 30 年来夏季北极增温和海冰减少主要由格陵兰岛和北冰洋上空的异常反气旋环流驱动,而海冰减少引发的反馈作用在其中作用很弱。Park 等[47]也指出,冬季大气环流异常导致的向极水汽和热量输送作用会导致向下长波辐射增加,而这在 1979—2011 年冬季大西洋一侧的北极海冰减少中占到约 50% 的贡献。在 2016 年 1~2 月北极极端偏暖事件中,极涡减弱、南风增强导致的向极输送作用增强也是主要原因[48]。此外,还有研究表明,冬季西伯利亚高压主体北部加强和北移有利于温暖空气向极输送导致北极增温[49]。

在北大西洋地区和北半球范围,大气环流的最显著模态分别是北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)和北极涛动(Arctic Oscillation, AO),它们都反映了北半球中高纬气压的反向变化关系,本质上则反映了中纬西风的强弱[50,51]。研究表明,NAO 对加拿大东北部和格陵兰岛的增温以及北极海冰向大西洋的输送都有显著影响[50]。而 AO 对 9 月海冰年际变化的贡献约占 22%[52],但 AO 与北极气温的联系可能正在减弱[53]。北极温度持续增高,AO 却并没有明显增强或减弱趋势。这可能与 21 世纪以来 AO 的变化有关。Zhang 等[54]指出,21 世纪以来,AO 由传统的三极型转变成前所未有的偶极型分布。相比中高纬度跷跷板的环流形式,冬季欧亚北部的反气旋环流对北极温度的影响更为明显[53]。

除了水汽和热量输送作用,大气环流控制的风场对海冰的运动和输出也有重要影响。已有研究指出,近期夏季北极中心区海冰的减少并不是因为融化,而与风场异常导致大量海冰向外输送有关[55]。在影响海冰的运动和输出方面,AO 和 NAO 都有贡献[23,52],但最显著的大气环流强迫是北极偶级型分布(Arcric Dipole, AD)[56,57]。Wu 等[56]在 2006 年提出,AD 是北极(70°N 以北)地区冬季(11 月至次年 3 月)海平面气压距平场 EOF 的第二特征向量场,方差贡献约为 13%。相比 AO 在北极的环形结构,AD 在极地有 2 个位相相反的中心,具有很强的经向性,是驱动海冰输出作用最显著的大气强迫[57]。AD 正位相时,波弗特涡旋减弱,格陵兰岛和巴伦之海的海冰偏多。受 AD 影响,拉普捷夫海和巴伦之海的海冰与表面气温变化都呈现跷跷板分布[56]。Wu 等[58]进一步指出,近 20 年来 9 月海冰减少趋势的原因不能简单归结为 AD 异常,而主要与风场优势模态的年代际变化有关。

3.2　海洋环流的作用

除了大气环流的作用,洋流的向极热量输送对北极放大也有贡献。北冰洋被欧亚和北美大陆环抱,仅通过白令海峡和弗拉姆海峡等几个通道与世界海洋相连。其中通过弗拉姆海峡和巴伦之海 2 个通道与北大西洋的联系在北极与外界的热交换中占据主导地位[59]。有研究指出,最近几十年通过弗拉姆海峡进入北极的大西洋海水明显偏多、偏暖,

这在过去2 000年历史上都没有出现过[60]。大西洋海水携带的大量热量在北冰洋释放，导致北极增温和海冰消融。Polyakov等[25]也指出，拉普捷夫海和东西伯利亚海等欧亚海盆东部海域的海冰消融与近期大西洋海水的流入密切相关。大西洋水的流入和海冰消融会导致北冰洋海水的混合层和盐跃层结构发生变化，使得海水内部的混合增强，海洋向大气的放热增多，进而导致北极升温。

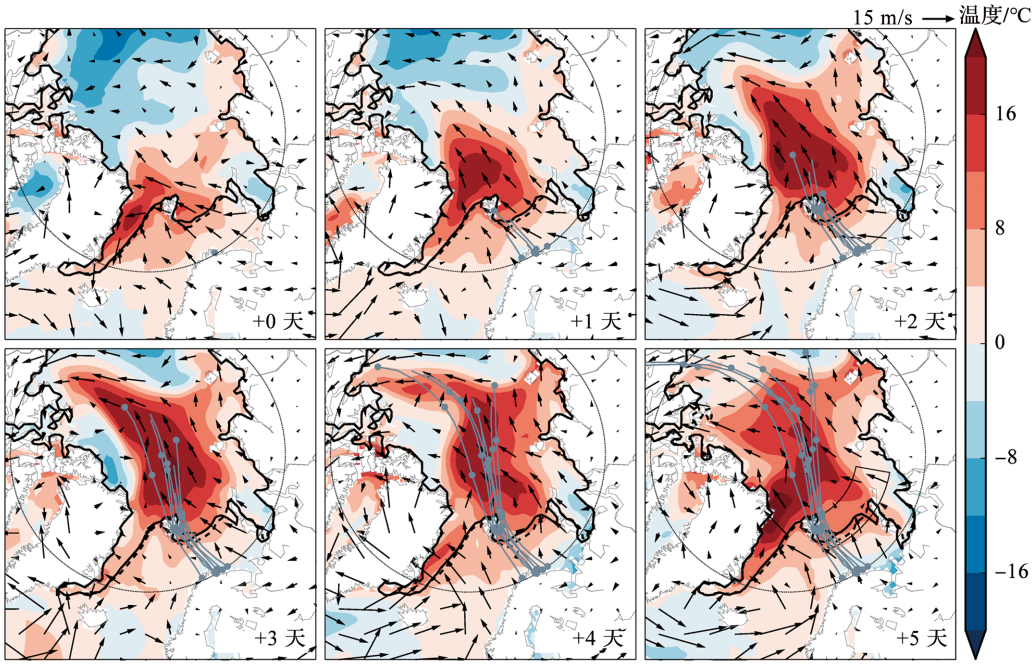


图2 一次(1999年12月27日18点开始于挪威北部)水汽入侵事件对北极温度的影响

Fig. 2 Case study of an intrusion event beginning over northern Norway at 18:00 UTC on 27 December 1999

灰点和灰线代表风暴中心的逐日位置和路径；颜色是地表气温异常(基于扣除季节循环的逐6小时资料)，箭头是10 m风场；黑色实线是15%海冰密集度等值线，黑色虚线是事件开始前5天的15%海冰密集度等值线；点线圆圈是70°N，第5天图中的扇形是巴伦之海的位置[40]

Each panel shows a snapshot at a time relative to the beginning of the event as indicated in the lower right corner. Gray lines show centroid trajectories with gray dots at 1-day intervals. The colour shows surface air temperature anomaly from a 6-hourly, smoothed seasonal cycle, arrows show 10 m wind, and the heavy black line shows the 15% SIC contour. As a reference, the dashed black line shows the 15% SIC contour five days before the beginning of the event. Dotted line is the 70°N latitude line. Thin black lines in the 5 days panel show the Barents Sea box[40]

大西洋与北极的热交换在很大程度上受到北大西洋经向翻转环流(Atlantic Meridional Overturning Circulation，AMOC)影响。AMOC是大西洋的重要热盐环流传送带，它将北大西洋低纬度的高温、高盐海水向北输送到高纬地区，并通过大气释放热量，海水变重下沉后形成北大西洋深层水，在中深层海洋向南输送，形成北大西洋热盐环流传送带[61,62]。之前的研究认为，AMOC变强时，大西洋的向极热量输送会增强[59]。但在过去北极急速升温的几十年间，AMOC却显著减弱[62,63]，所以一些研究者倾向于认为AMOC并非驱动北极放大的原因[30]。但Chen等[62]的最新成果显示，弱的AMOC可以增强全球变暖。这是因为AMOC减弱虽然会导致低纬向高纬的热输送减弱，但同时，表层向次表层和中深层海洋的热量输送也会减少，辐射作用形成的热量更多停留在海洋表面，进而驱动全球增暖。这也为AMOC影响北极温度的机制研究提供了新视角。

3.3 大西洋和太平洋海温的调制

太平洋和大西洋海表温度都具有显著的年代际变化，其主要的分布型分别为太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation，PDO)和大西洋多年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation，AMO)。PDO是一种类似于厄尔尼诺与南方涛动(El Niño-Southern Oscillation，ENSO)型的具有年代尺度生命史的太平洋变率。根据太平洋海温异常可以将PDO分为冷、暖位相。PDO暖位相时，热带中东太平洋异常暖，北太平洋中部异常冷，而沿北美西岸却异常暖，反之是PDO冷位相。典型PDO事件可持续20～30年，远长于ENSO事件，而且PDO的主信号位于

北太平洋,次信号位于热带,ENSO则相反[64]。AMO是指北大西洋海盆尺度海温具有多年代际周期的冷暖位相交替变化的现象,具有65~80年的周期,振幅约为0.4 °C,其形成主要跟AMOC有关[59,65]。

20世纪初期,北极也有一次明显的增温过程,与近几十年的北极放大非常类似[66~68]。但与近期相比,20世纪初期的温室气体强迫远低于现在的水平[69],海冰也没有明显减少[70]。Tokinaga等[66]通过设置大西洋和太平洋的海表温度年代际变化,成功模拟出了20世纪初期的北极增温,由此认为AMO和PDO是20世纪初期北极增温的重要驱动因素,当AMO和PDO同时处于正位相时,北极的增温最强,反之则是显著偏冷(图3)。当PDO处于正位相时,赤道太平洋的增暖导致阿留申低压加深,有利于暖空气进入北美一侧的北极。而热带外大西洋和北太平洋的增暖可以导致大西洋一侧的北极增温。Svendsen等[68]通过耦合模式进一步将PDO的作用独立出来分析,认为PDO正位相使得极涡减弱,造成北极的下沉运动增加和绝热加热增强,这是20世纪初期北极增温的主要机制。Praetorius等[71]也认为,北极温度对北太平洋海温的变化更为敏感。虽然已有一些研究,但PDO和AMO对北极增温的驱动机制尚未有定论。需要指出的是第六次耦合模式比较计划(The six phase of Coupled Model Inter-comparison Project, CMIP6)中的子计划全球季风模式比较计划(The Global Monsoons Model Inter-comparison Project, GMMIP)将利用耦合模式考察PDO与AMO在过去百年气候变化中的作用,其结果将有利于理解二者的贡献[72]。

还有研究认为,热带太平洋是调控全球温度变化的关键区[73,74]。对于北极来说,热带太平洋海温的调制作用也很重要。Ding等[23]指出,NAO环流异常可以导致加拿大东南部和格陵兰岛等地区的增温,而驱动NAO异常的机制则是热带太平洋海温激发的异常罗斯贝波列活动,只考虑人类活动影响无法在模式中模拟出类似的增温。Hu等[32]的结果显示,20世纪70年代末以来厄尔尼诺发生的频率、位置、强度等特征都明显改变,中部型厄尔尼诺的增多可使赤道辐合带偏北和对流加深,其与北极地区的大尺度遥相关也随之增强,这对夏季北极的增温和海冰融化有抑制作用,北极放大在夏季不明显也与中部型厄尔尼诺事件增多有关。Wu[75]的研究则表明,前期秋季热带中、东太平洋海温的异常偏冷有利于冬季北极增暖。

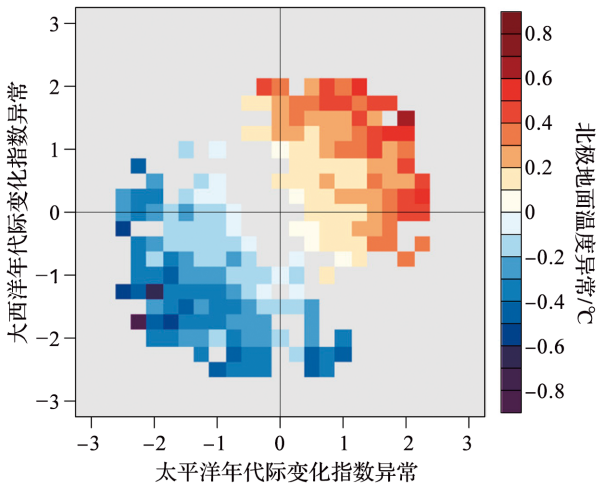


图3　基于37个CMIP5工业革命前模拟试验结果的标准化太平洋年代际指数(PDV)和大西洋年代际指数(AMV)的北极地表温度合成

Fig. 3　Composite anomalies of Arctic mean LSAT (in degrees Celsius) as a function of the normalized PDV and AMV indices, based on 37 CMIP5 preindustrial control simulations

PDV指数是太平洋(120°E~70°W, 50°S~60°N)11月至3月海表温度距平(扣除趋势并进行8年低通滤波处理)EOF分析第一模态的时间系数,AMV指数则是北大西洋(60°W~0°,0°~70°N)的平均海表温度异常(资料预处理同PDV),灰色区域代表未通过95%的显著性检验[66]

The PDV index is defined as the principal component of the first EOF for detrended, 8-year low-pass—filtered November—March mean SST anomalies over the Pacific (120°E~70°W, 50°S~60°N). Using the same data, the AMV index is defined as the SST anomaly averaged over the North Atlantic (60°W~0°, 0°~70°N). Insignificant composite anomalies at the 95% confidence level are shaded in gray[66]

4　总结与讨论

北极放大的原因非常复杂,既有北极独特地理环境的作用,又与极地外的热量输送有关(图4)。局地方面,海冰—反照率正反馈、云和水汽增加导致的向下长波辐射增强是北极放大的重要原因,而较低的背景温度和相对稳定的大气层结,使得温度反馈在北极为正,有利于变暖信号被放大。向极输送方面,大气环流和洋流的变化使向极水汽和热量输送增多,而大西洋和太平洋海温的年代际变化以及热带太平洋海温异常是驱动大气环流变化的主要原因。

虽然取得了许多进展,但仍有一些关键问题尚存争议或尚未解决,主要是2个方面:

(1)有些因素驱动北极放大的机制尚存争议。许多研究认为,海冰消融在北极放大中的作用非常关键[1,15~19,34],如Dai等[17]的最新研究表明,海冰的

消融是北极放大的必要条件，其他物理过程都要通过融化海冰间接影响北极增暖。而有些研究结果则显示[20,68,76,77]，即使不考虑海冰的作用，北极放大效应依然显著；关于PDO暖位相对北极增暖的贡献，现有结果也很不一致。有研究指出，PDO暖位相有利于北极的增暖[66,68]，而Screen等[78]的结果则显示，PDO暖位相对海冰与气温之间的正反馈有抑制作用，近期PDO的位相转正可能意味着北极放大速度将趋缓。此外，热带海温和AMOC等因素驱动北极放大的机制还不清楚，这些都需要深入研究。

（2）不同因素对驱动北极放大的相对贡献仍不清楚。目前的大部分结果都是定性研究，但对不同驱动机制相对贡献的定量研究还比较少，已有的研究结果也很不一致（表1）。海冰消融[1,15~19,34]、水汽增多[40~45]、温度反馈[21,79]、海温变化[23,32,66~68]和洋流输送[25,60]等都被分别认为是北极放大的核心驱动。由于气候系统是高度耦合的整体，不同因素之间存在复杂的相互作用（图4），评估不同因素的相对重要性以及量化某一因素的贡献都是非常困难的。如北极外的向极热输送会导致北极增暖，又可以激发海冰消融、海气相互作用增强等一系列北极局地响应。海冰和温度变化又会反过来对大气环流、海洋环流等造成影响。此外，不同时间尺度、不同季节、不同区域、不同高度上驱动北极放大的机制可能都不相同。如在近地面，海冰消融导致的下垫面加热作用非常重要，而在对流层中高层，向极热量和水汽输送的作用可能更为关键[45,75~77,80]；不同季节中北极的海冰、日照、背景气温等条件都存在明显差异，其增温的驱动机制也可能存在显著差别[39]。

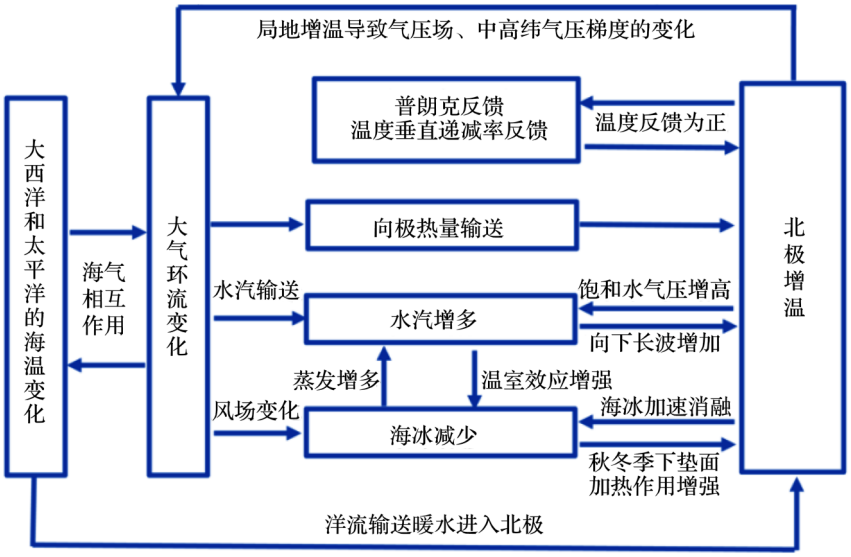


图4 北极放大的驱动机制

Fig. 4 Driving mechanisms of the Arctic amplification

表1 不同驱动机制对北极放大相对贡献的部分研究结论

Table 1 Several conclusions on the relative contribution of different driving mechanisms to Arctic amplification

作者	研究方法	主要结论
Langen等[79]	数值模拟	温度反馈是北极放大的主要原因，水汽反馈不能导致北极放大，但会增加气候敏感性
Taylor等[19]	数值模拟	最大贡献项是反照率反馈，其次是云反馈，再次是大气传输作用
Pithan等[21]	CMIP5模式评估	温度反馈贡献最大，其次是反照率反馈
Graversen等[16]	数值模拟	表面反照率反馈的贡献约40%，温度递减率反馈的贡献约15%
Park等[77]	数值模拟	热带强迫对北极放大的分布型有最大贡献，而北极放大的程度主要由局地强迫决定
Dai等[17]	统计和CMIP5模式评估	海冰快速融化是最关键因素，其他物理过程要通过融化海冰间接影响北极放大

由于北极放大是目前气候研究的热点问题，有大量工作涉及。本文只是选择性地总结了部分代表性成果。限于作者水平，对一些重要工作难免会有遗漏，敬请读者指正。

参考文献(References):

[1] Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification [J]. *Nature*, 2010, 464 (7 293): 1 334-1 337.

[2] Serreze M C, Barry R G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis [J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 77: 85-96.

[3] Cullather R I, Lim Y-K, Boisvert L N, *et al*. Analysis of the warmest Arctic winter, 2015-2016 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43: 10 808-10 816.

[4] Kinnard C, Zdanowicz C M, Fisher D A, *et al*. Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years [J]. *Nature*, 2011, 479 (7 374): 509-512.

[5] Kwok R, Rothrock D A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958-2008 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009: L15501. DOI:10.1029/2009GL039035.

[6] Bushuk T, Hudson S R, Granskog M A, *et al*. Spectral albedo and transmittance of thin young Arctic sea ice [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121 (1): 540-553.

[7] Lenton T M, Held H, Kriegler E, *et al*. Tipping elements in the Earth's climate system [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105 (6): 1 786-1 793.

[8] Ma S, Zhu C, Liu B, *et al*. Polarized response of East Asian winter temperature extremes in the Era of Arctic warming [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31 (14): 5 543-5 557.

[9] Kug J S, Jeong J H, Jang Y S, *et al*. Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8 (10): 759-762.

[10] Wu Z, Li X, Li Y, *et al*. Potential influence of Arctic Sea Ice to the interannual variations of East Asian spring precipitation [J]. *Journal of Climate*, 2016, 29 (8): 2 797-2 813.

[11] Wu B, Zhang R, Wang B, *et al*. On the association between spring Arctic sea ice concentration and Chinese summer rainfall [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L09501. DOI: 10.1029/2009GL037299.

[12] 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 of the United States of America*, 2012, 109 (11): 4 074-4 079.

[13] Oudar T, Sanchez-Gomez E, Chauvin F, *et al*. Respective roles of direct GHG radiative forcing and induced Arctic sea ice loss on the Northern Hemisphere atmospheric circulation [J]. *Climate Dynamics*, 2017, 49 (11/12): 3 693-3 713.

[14] Coumou D, Di Capua G, Vavrus S, *et al*. The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation [J]. *Nature Communications*, 2018, 9 (1). DOI:10.1038/s41467-018-05256-8.

[15] Screen J A, Simmonds I. Increasing fall-winter energy loss from the Arctic Ocean and its role in Arctic temperature amplification [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37 (16). DOI:10.1029/2010gl044136.

[16] Graversen R G, Langen P L, Mauritsen T. Polar amplification in CCSM4: Contributions from the lapse rate and surface albedo feedbacks [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27 (12): 4 433-4 450.

[17] Dai A, Luo D, Song M, *et al*. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO_2 [J]. *Nature Communications*, 2019. DOI:10.1038/s41467-018-07954-9.

[18] Yim B Y, Min H S, Kim B M, *et al*. Sensitivity of Arctic warming to sea ice concentration [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121 (12): 6 927-6 942.

[19] Taylor P C, Cai M, Hu A, *et al*. A decomposition of feedback contributions to polar warming amplification [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26 (18): 7 023-7 043.

[20] Graversen R G, Wang M. Polar amplification in a coupled climate model with locked albedo [J]. *Climate Dynamics*, 2009, 33: 629-643.

[21] Pithan F, Mauritsen T. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7 (3): 181-184.

[22] Kapsch M-L, Graversen R G, Tjernström M. Springtime atmospheric energy transport and the control of Arctic summer sea-ice extent [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3 (8): 744-748.

[23] Ding Q, Wallace J M, Battisti D S, *et al*. Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in northeastern Canada and Greenland [J]. *Nature*, 2014, 509 (7 499): 209-212.

[24] Messori G, Woods C, Caballero R. On the drivers of wintertime temperature extremes in the high Arctic [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31 (4): 1 597-1 618.

[25] Polyakov I V, Pnyushkov A V, Alkire M B, *et al*. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean [J]. *Science*, 2017, 356 (6 335): 285-291.

[26] Zhou Tianjun, Chen Xiaolong. The uncertainty in the 2 °C warming threshold issue as related to climate sensitivity and climate feedback [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 73 (4): 624-634.[周天军,陈晓龙. 气候敏感度、气候反馈过程与2°C升温阈值的不确定性问题[J]. 气象学报,2015, 73(4): 624-634.]

[27] Perovich D K. Complex yet translucent: The optical properties of sea ice [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2003, 338 (1/4): 107-114.

[28] Bushuk M, Msadek R, Winton M, *et al*. Summer enhancement of Arctic Sea ice volume anomalies in the september-ice zone [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30: 2 341-2 362.

[29] Wu Fengmin, He Jinhai, Qi Li, *et al*. The seasonal difference of Arctic warming and it's mechanism under sea ice cover diminishing [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36 (3): 39-47.[武丰民, 何金海,祁莉,等. 海冰消融背景下北极增温的季节差异及其原因探讨[J]. 海洋学报, 2014, 36 (3): 39-47.]

[30] Cao Yunfeng, Liang Shunlin. Recent advances in driving mechanisms of the Arctic amplification: A review [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(26): 2 757-2 774.[曹云锋,梁顺林. 北极地区快速升温的驱动机制研究进展[J]. 科学通报, 2018, 63(26): 2 757-2 774.]

[31] Laîné A, Yoshimori M, Abe-Ouchi. A surface Arctic amplifica-

tion factors in CMIP5 Models: Land and oceanic surfaces and seasonality [J]. *Journal of Climate*, 2016, 29 (9): 3 297-3 316.

[32] Hu C, Yang S, Wu Q, *et al*. Shifting El Niño inhibits summer Arctic warming and Arctic sea-ice melting over the Canada Basin [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11 721.

[33] Bushuk M, Msadek R, Winton M, *et al*. Skillful regional prediction of Arctic sea ice on seasonal timescales [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44: 4 953-4 964. DOI: 10.1002/2017GL073155.

[34] Lang A, Yang S, Kaas E. Sea ice thickness and recent Arctic warming [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44: 409-418. DOI: 10.1002/2016GL071274.

[35] Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, *et al*. Physics of the Atmosphere [M]. Beijing: Peking University Press, 2003.[盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2003.]

[36] Sejas S A, Cai M. Isolating the temperature feedback loop and its effects on surface temperature [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73 (8): 3 287-3 303.

[37] Hu Xiaoming, Cai Ming, Yang Song, *et al*. Air temperature feedback and its contribution to global warming [J]. *Science in China* (*Series D*), 2018,61(10):1 491-1 509.[胡晓明, 蔡鸣, 杨崧, 等. 大气温度反馈的机理及其对全球增暖的贡献[J]. 中国科学:D辑, 2019,49(2):468-486.]

[38] Cao Y, Liang S, Chen X, *et al*. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 8 462.

[39] Kapsch M-L, Graversen R G, Tjernström M, *et al*. The effect of downwelling longwave and shortwave radiation on Arctic summer sea ice [J]. *Journal of Climate*, 2016, 29 (3): 1 143-1 159.

[40] Woods C, Caballero R. The role of moist intrusions in winter arctic warming and sea ice decline [J]. *Journal of Climate*, 2016, 29 (12): 4 473-4 485.

[41] Vázquez M, Nieto R, Drumond A, *et al*. Extreme sea ice loss over the Arctic: An analysis based on anomalous moisture transport [J]. *Atmosphere*, 2017, 8 (12): 32.

[42] Wang Cen, Ren Baohua, Zheng Jianqiu, *et al*. Mechanism analysis of the sudden Arctic surface warming on 29 December 2015 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 41 (6): 1 343-1 351.[王岑, 任保华, 郑建秋, 等. 2015年12月29日北极地面爆发性增温的成因分析[J]. 大气科学, 2017, 41 (6): 1 343-1 351.]

[43] Gong T, Feldstein S, Lee S. The role of downward infrared radiation in the recent arctic winter warming trend [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30 (13): 4 937-4 949.

[44] Mortin J, Svensson G, Graversen R G, *et al*. Melt onset over Arctic sea ice controlled by atmospheric moisture transport [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43: 6 636-6 642. DOI: 10.1002/2016GL069330.

[45] Liu Y, Key J R. Less winter cloud aids summer 2013 Arctic sea ice return from 2012 minimum [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9 (4): 044002.

[46] Ding Q, Schweiger A, L'Heureux M, *et al*. Influence of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 289-295.

[47] Park D-S R, Lee S, Feldstein S B. Attribution of the recent winter sea ice decline over the atlantic sector of the Arctic Ocean [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28 (10): 4 027-4 033.

[48] Overland J E, Wang M. Recent extreme arctic temperatures are due to a split polar vortex [J]. *Journal of Climate*, 2016, 29 (15): 5 609-5 616.

[49] Feng C, Wu B. Enhancement of winter arctic warming by the siberian high over the past decade [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2015, 8(5): 257-263.

[50] Gong Daoyi, Zhou Tianjun, Wang Shaowu. Advance in the studies on North Atlantic Oscillation (NAO) [J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(3): 413-420.[龚道溢,周天军,王绍武. 北大西洋变率研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16 (3): 413-420.]

[51] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25 (9): 1 297-1 300.

[52] Park H S, Stewart A, Son J H. Dynamic and thermodynamic impacts of the winter Arctic Oscillation on summer sea ice extent [J]. *Journal of Climate*, 2017, 31 (4): 1 483-1 497.

[53] Ogi M, Rysgaard S, Barber D G. Importance of combined winter and summer Arctic Oscillation (AO) on September sea ice extent [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11 (3): 034019.

[54] 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: L22701. DOI: 10.1029/2008GL035607.

[55] Zhao J, Barber D, Zhang S, *et al*. Record low sea-ice concentration in the central Arctic during summer 2010 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 35 (1): 106-115.

[56] Wu B, Wang J, Walsh J E. Dipole anomaly in the winter arctic atmosphere and its association with sea ice motion [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19 (2): 210-225.

[57] Ikeda M. Sea-ice cover anomalies in the Arctic Basin associated with atmospheric variability from multi-decadal trends to intermittent quasibiennial oscillations [J]. *Polar Research*, 2012, 31 (1): 18 690. DOI: 10.3402/polar.v31i0.18690.

[58] Wu B, Overland J E, D'Arrigo R. Anomalous Arctic surface wind patterns and their impacts on september sea ice minima and trend [J]. *Tellus A*: *Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2012, 64 (1): 18 590.

[59] Zhang R. Mechanisms for low-frequency variability of summer Arctic sea ice extent [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112 (15): 4 570-4 575.

[60] Spielhagen R F, Werner K, Sorensen S A, *et al*. Enhanced modern heat transfer to the Arctic by warm Atlantic water [J].

Science, 2011, 331 (6 016): 450-453.

[61] Zhou Tianjun. Adjustment of the north Atlantic thermohaline circulation to the atmospheric forcing in a global air-sea coupled model [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(2): 164-180.[周天军. 全球海气耦合模式中热盐环流对大气强迫的响应 [J]. 气象学报,2003,61(2): 164-180.]

[62] Chen X, Tung K-K. Global surface warming enhanced by weak Atlantic overturning circulation [J]. *Nature*, 2018, 559 (7 714): 397-391.

[63] Rahmstorf S, Box J E, Feulner G, *et al*. Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5 (5): 475-480.

[64] Yang Xiuqun, Zhu Yimin, Xie Qian, *et al*. Advances in studies of Pacific decadal oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28(6): 979-992.[杨修群,朱益民,谢倩,等. 太平洋年代际振荡的研究进展 [J]. 大气科学,2004, 28 (6): 979-992.]

[65] Kerr R A. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries [J]. *Science*, 2000, 288 (5 473): 1 984-1 986.

[66] Tokinaga H, Xie S, Mukougawa H. Early 20th-century Arctic warming intensified by Pacific and Atlantic multidecadal variability [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 114 (24): 6 227-6 232.

[67] Suo L, Otterå O H, Bentsen M, *et al*. External forcing of the early 20th century Arctic warming [J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2013, 65: 20 578.

[68] Svendsen L, Keenlyside N, Bethke I, *et al*. Pacific contribution to the early twentieth-century warming in the Arctic [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8 (9): 793-797.

[69] Myhre G, Shindell D, Bréon F M, *et al*. Anthropogenic and natural radiative forcing [M]//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, UK: Cambridge University Press, 2013.

[70] Vaughan D, Comiso J, Allison J. *et al*. Observations: Cryosphere [M]// 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, UK: Cambridge University Press, 2013.

[71] Praetorius S, Rugenstein M, Persad G, *et al*. Global and Arctic climate sensitivity enhanced by changes in North Pacific heat flux [J]. *Nature Communications*, 2018,9(1):3 124.

[72] Zhou T, Turner A G, Kinter J L, *et al*. GMMIP (v1.0) contribution to CMIP6: Global Monsoons Model Inter-comparison Project [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(10): 3 589-3 604.

[73] Kosaka Y, Xie S. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling [J]. *Nature*, 2013, 501 (7 467): 403.

[74] Kosaka Y, Xie S. The tropical Pacific as a key pacemaker of the variable rates of global warming [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9 (9): 669-673.

[75] Wu B. Winter atmospheric circulation anomaly associated with recent arctic winter warm anomalies [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30 (21): 8 469- 8479.

[76] Graversen R G, Mauritsen T, Tjernstrom M, *et al*. Vertical structure of recent Arctic warming [J]. *Nature*, 2008, 451(7 174): 53-56.

[77] Park K, Kang S M, Kim D, *et al*. Contrasting local and remote impacts of surface heating on polar warming and amplification [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31 (8): 3 155-3 166.

[78] Screen J A, Francis J A. Contribution of sea-ice loss to Arctic amplification is regulated by Pacific Ocean decadal variability [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6 (9): 856-860.

[79] Langen P L, Graversen R G, Mauritsen T. Separation of contributions from radiative feedbacks to polar amplification on an Aquaplanet [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25 (8): 3 010-3 024.

[80] Perlwitz J, Hoerling M, Dole R. Arctic tropospheric warming: Causes and linkages to lower latitudes [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28 (6): 2 154-2 167.

Causes of Arctic Amplification: A Review

Wu Fengmin[1], Li Wenkai[2], Li Wei[2]

(1.*Zhejiang Meteorological Research Institute*, *Hangzhou* 310008, *China*; 2.*Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044, *China*)

Abstract: The pace of Arctic warming is about double that at lower latitudes in the recent decades, a robust phenomenon known as Arctic Amplification (AA), which has become one of the most notable features of climate change. This review summarized the major advances of the mechanism of AA from both local factors and poleward heat transport from lower latitudes. Local factors, including positive ice-albedo feedback and increasing downwelling longwave radiation caused by water vapor and cloud, play an important role in AA. Due to the colder background temperatures and the more stable vertical structure than the lower latitudes, the temperature feedback is therefore positive, which induces the warm signal amplified in the Arctic. The poleward heat transport via atmosphere circulation and ocean currents is also a contributor to AA, and the multidecadal variability in the Pacific, the Atlantic and the tropical Pacific surface temperature are the dominant forcing of the atmosphere circulation. Finally, several issues that remain to be solved were proposed.

Key words: Arctic amplification; Climate feedback; Poleward heat transport; Sea temperature regulating.

2019 年第 4 期要目

苏鲁人类扰动区表土花粉组合与植被关系的研究 …… 李永飞,李春海,舒军武,李月丛,许清海

水热体系中 Na_2SO_4/K_2SO_4 溶解度的热力学计算 …… 张 为,周 丽,唐红峰,李和平,王 力

内蒙古狼山地区早二叠世晚期花岗闪长岩:地球化学、年代学、Hf同位素特征及其地质意义

…… 刘 洋,王文龙,滕学建,郭 硕,滕 飞,何 鹏,田 健,段霄龙

基于长时序 Landsat5/8 多波段遥感影像的青海湖面积变化研究 …… 韩伟孝,黄春林,王昀琛,顾 娟

First author: Wu Fengmin(1986-), male, Feicheng County, Shandong Province, Engineer. Research areas include the driving mechanisms and influences of Arctic climate change. **E-mail**:fmwu_zjqks@163.com