

北极-中纬度联系与北极海冰变化的关系研究新进展

武炳义

复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438

教育部海-冰-气耦合系统与天气气候重点实验室, 上海 200438

摘 要:

本文概要介绍了近年来(2018-2023 年), 北极-中纬度联系与北极海冰变化的关系研究新进展。主要包括以下几个方面:(1) 对北极海冰融化在欧洲极端降雪个例中的贡献有了实质性的认识,这是以往研究提出的北极海冰影响大气环流的机制所无法解释的。(2) 冬季亚洲区域气温对北极海冰持续融化的响应有显著的低频振荡特征。北极海冰持续融化,有利于冬季暖北极-冷欧亚(2004/05-2012/13)和暖北极-暖欧亚(2013/14-2016/17)交替出现。前一阶段北极-中纬度联系加强,而暖北极-暖欧亚阶段北极与东亚的联系减弱了,但海冰融化影响北极-欧亚大陆联系强弱变化的机理不清楚。(3) 在夏季平均和季节内时间尺度上,东亚中、低纬度区域夏季高温热浪极端天气事件与同期北极对流层中、低层冷异常有直接的动力联系。北极夏季对流层中、低层冷异常不仅有利于减缓北极海冰融化,而且成为预测后期东亚冬季风趋势的前兆因子。(4) 北极夏季海冰融化异常,对我国华北以南区域夏季降水并无实质性影响。(5) 尽管诸多研究强调了平流层-对流层

收稿日期 2023-04-18; **网络预出版日期**

作者简介 武炳义,男,1964 年出生,教授,主要从事北极海冰—气相互作用及其对天气事件和气候变率的影响研究。E-mail: bywu@fudan.edu.cn

资助项目 国家重点研究和发展计划项目(2019YFA0607002), 国家重点研发计划“地球系统与全球变化”专项(2022YFF0801701), 国家自然科学基金项目(42375023)

Funded by National Key Research and Development Program of China (2019YFA0607002), National Key Research and Development Program of China “Earth System and Global Change” Special Project (2022YFF0801701), and National Natural Science Foundation of China (42375023)

相互作用，在连接北极海冰融化与中纬度天气气候中起重要作用，但因果联系依然偏弱，不确定性大于对流层过程。(6) 区分北极海冰强迫与大气内部变率在天气事件和气候变率中的不同作用已无实际意义。未来关注北极海冰融化的影响，更应注重其在大气环流低频变化中的作用，以及北极海冰异常空间分布差异和不同异常振幅的影响，同时需要定量化研究北极海冰融化在极端天气和气候事件中的作用。

关键词： 北极海冰， 极端天气， 夏季降水， 北极-中纬度联系

引 言

在过去的 50 多年时间里，人们在北极海冰物理特性及其对天气气候的影响方面，进行了不懈的探索，特别是在气候系统模式方面的长足发展，成为探究北极海冰影响的强有力工具，所取得的成果深刻地改变了我们的认知。关于北极海冰变化及其与天气事件、气候变率的关系，人们的认知也是曲折起伏的，由初期的通过数值模拟试验认为北极海冰变化对大气环流有影响（Fletcher, 1968; Newson, 1973; Warshaw and Rapp, 1973; Royer et al., 1990），到认为北极海冰变化的影响偏弱（Alexander et al., 2004; Mori et al., 2014; Peings and Magnusdottir, 2014），进而质疑甚至否定北极海冰的影响（Screen et al., 2013, 2014; Perlwitz et al., 2015; Ogawa et al., 2018; Blackport et al., 2019; Peings, 2019），以及再次确认有影响的过程（Overland et al., 2021; Bailey et al., 2021; Ding et al., 2021; Smith et al., 2019, 2022; Outten et al., 2023）。相信随着研究的不断深入，我们的认识还会在不同程度上重复类似上述过程，这也体现了基础研究本身所特有的不确定性。

北极海冰融化对大气环流的影响效果受多种因素制约，不存在明确统一的范式。Blackport 等（2019）认为，只有当海冰减少并伴随着从大气向海洋传输异常热量时（大气驱动海冰），模式才可以捕捉到观测联系的主要特征。因此，他们认为异常大气环流同时驱动中纬度冷冬和温和的北极，北极海冰减少对中纬度严冬的影响最小。该结论明显与 Bailey 等（2021）的观测研究结果相抵触，无法

令人信服。北极海冰强迫的数值模拟试验显示，北极海冰变化的影响一般小于大气内部变率（除对秋、冬季节局地表面气温的影响外），因此在样本数不是很多的北极海冰强迫数值模拟试验中，检测出北极海冰异常对中纬度的显著影响并不容易。同时，也正是因为北极海冰影响偏弱，导致诸多研究结果缺乏一致性。究其原因，一方面，与使用的资料、分析方法、模拟试验设计，以及研究者的观点不同有直接的关系。另一方面，大气环流对北极海冰变率的响应不仅取决于海冰的直接影响效果，而且与非线性过程（Petoukhov and Semenov, 2010），北极海冰的背景条件（Semenov and Latif, 2015），数值模式的背景状态（Smith et al., 2019），模式大气环流初值（Wu et al., 2016, 2017; Yu and Wu, 2023），以及诸如热带强迫等其它影响因子有直接的关系（Sato et al., 2014; Screen and Francis, 2016; Warner et al., 2020; Rudeva and Simmonds, 2021）。因此，冬季大气环流对北极海冰融化的影响不可能在空间上，表现出特定的范式（Wu et al., 2022）。

关于海冰变化影响中纬度天气事件和气候变率的可能机理，以往研究所概括的对流层过程（Alexander et al., 2004; Deser et al., 2004）和平流层-对流层相互作用过程（Jaiser et al., 2013; Cohen et al., 2021）依然有明显的局限性。例如，它们均无法解释巴伦支海海冰异常偏少导致的 2018 年 2-3 月欧洲极端强降雪事件。近年来，有很多研究均强调了平流层过程，在联系北极海冰（欧亚大陆积雪）与欧亚和北美大陆极端天气事件和冷冬中起重要作用（McKenna et al., 2018; Zhang et al., 2018; Overland et al., 2021; Kretschmer et al., 2018; Siew et al., 2020; Zhang et al., 2022; Tian et al., 2023）。平流层过程甚至可以影响海表温度和北极海冰密集度（Zhang et al., 2022），但关于北极海冰融化通过平流层路径影响中纬度区域对流层过程，还存在很大的不确定性。McKenna 等（2018）揭示了不同区域的北极海冰融化对北半球的影响是截然不同的。他们研究发现，对于大规模和中等规模的北极海冰融化，海冰对冬季平流层极涡的影响是相反的。而对于中等规模的海冰融化，对流层北极涛动（AO）的响应正、负位相均可能出现；对于大规模的海冰融化，对流层响应类似强的 AO 负位相。这表明随着海冰融化的加剧，对流层机制变得比平流层过程更为重要。Zhang 等（2018）认为，平流层对北极海冰强迫的响应，对于冬季冷西伯利亚是至关重要的，并指出，与对流层的直接响应相比，平流层过程起着更为重要的作用，特别是平流层异常信号的下传影响。他们

高度强调了模式在反映平流层-对流层耦合能力的重要性。

一般认为,平流层突然变暖之后,欧洲和美国各地通常会出现寒冷和暴风雪天气,加拿大北部的气温也会升高。2021年1月5日平流层突然变暖之后也出现了上述现象(Davis et al., 2022)。针对发生在2021年2月的北美严寒和暴雪天气过程,Cohen等(2021)认为,秋季欧亚大陆积雪增加和巴伦支-喀拉海海冰减少,可以通过影响平流层极涡的拉伸变形,进而影响中纬度,引起北美极端严寒和暴雪天气。但是通过数值模拟试验,Davis等(2022)发现,平流层突然变暖在随后的四周时间内对地表温度影响有限。他们认为发生在2021年1月的平流层爆发性增暖与同年2月美国严寒和暴雪天气没有关系,而对流层大气状态是造成2021年2月北美创纪录低温的主要原因。Siew等(2020)也认为,连接秋季北极海冰与冬季北大西洋涛动的平流层路径是高度间歇性的,在观测的样本中,只有16%的个例呈现完整的平流层路径。该路径的间歇性与数值模拟试验中北极海冰融化的影响偏弱是一致的,说明北极海冰融化在北极-中纬度联系中的作用易受其它因素影响。最新的研究结果显示,平流层突然变暖的发生概率主要取决于地磁活动、太阳活动以及准两年振荡位相的有利组合(Vokhmyanin et al., 2023),而不是乌拉尔阻塞高压异常和北极海冰融化,进一步证实北极海冰异常偏少与平流层过程的联系偏弱。

在上述研究背景下,本文概述近年来(2018-2023)在北极-中纬度联系与北极海冰变化研究的新进展。由于这方面研究内容非常之多,这里只能以个人的视角来审视和概括研究的新进展,这样不可避免地遗漏一些重要的研究工作,请读者指正、见谅。概述内容包括以下三个方面:(1)极端天气事件与北极海冰融化的联系;(2)北极-中纬度联系强弱的阶段性变化特征及其影响;(3)北极海冰融化对夏季东亚降水的影响。

1. 极端天气事件与北极海冰异常变化的联系

近年来,寒潮、暴雪、雾霾、高温热浪以及强降水过程频繁出现,日益受到人们的关注,尽管这些极端天气事件的形成原因复杂多变,但均可能与北极大气环流有密切的关系(Wu et al., 2017; Zou et al., 2017; Cohen et al., 2021; Wu and Francis, 2019; 董晓峣和武炳义, 2019; Luo et al., 2017, 2019; Luo et al., 2021)。

以下从三个方面概述极端天气与北极海冰变化关系的研究进展。

（1）极端严寒暴雪事件

首次观测研究证实，北极海冰融化是导致极端严寒大雪天气事件的主要原因。2018 年 2-3 月，一个强的高气压天气系统席卷了斯堪的纳维亚半岛，寒冷的东风导致欧洲出现极端的严寒，北极冷空气笼罩欧洲大陆数周，罗马南部都出现了降雪。Bailey 等（2021）研究发现，在该极端事件过程中，异常偏暖的巴伦支海提供了 9.3 毫米/天水汽通量，整个过程从巴伦支海蒸发约 1400 亿吨水汽，在欧洲北部有高达 88% 的降雪可能来自巴伦支海的表面蒸发（对应该海域海冰异常偏少）。再分析数据显示，在 1979-2020 年间，巴伦支海 3 月的净蒸发量增加了 70 千克/每平方米海冰融化（Bailey et al., 2021）。该研究把北极海冰的融化量与海水蒸发量、极端降雪量直接联系起来，明显不同于以往研究中强调的由北极海冰融化引起的对流层大气环流的负反馈机理以及平流层-对流层的相互作用机制。

2021 年 2 月中旬，来自北极的强冷空气席卷美国中、南部地区，造成严重损失，德克萨斯州受灾最为严重，导致短时间内的能源供应大面积瘫痪。Cohen 等（2021）认为，秋季欧亚大陆积雪增加和巴伦支-喀拉海海冰减少可以通过影响平流层极涡的拉伸变形，进而影响中纬度，引起北美极端严寒和暴雪天气。该研究强调的是欧亚大陆积雪和北极海冰外强迫，通过影响平流层途径，进而影响中纬度区域的天气过程。Yao 等（2023）分析了 2022 年 11-12 月期间频繁影响北美和欧亚大陆的极端严寒和暴雪事件，并从动力学角度分析了乌拉尔和阿拉斯加阻塞高压异常维持的背景动力条件（经向位涡梯度），认为该背景动力条件与北极海冰融化有关系。

（2）高温热浪事件

近年来，在北极-中纬度联系中的进展之一，就是揭示了夏季东亚中纬度区域的高温热浪事件与北极大气环流异常的关系，进而可能与北极海冰变化的联系（Wu and Francis, 2019; Francis and Wu, 2020）。研究发现，包括长江中、下游流域的中纬度区域夏季高温热浪发生频次，与该区域对流层西风的系统性减弱有直接的联系。夏季该区域对流层西风的减弱，有利于对流层高压异常的形成，进而压制了对流活动，有更多的太阳短波辐射加热地表，有利于形成高温热浪天气。当长江中、下游流域出现高温热浪时，北极大部分区域则纬向西风加强，夏季欧亚

大陆纬向西风的系统性北移,是连接东亚中纬度区域高温热浪和北极西风加强的主要机制。实际上,夏季对流层高层纬向风的系统性变化,可能更多地反映了大气环流自身变化优势特征。在夏季季节内时间尺度上,长江流域的极端高温热浪事件与同期北极对流层西风的加强也存在直接的动力联系(董晓晓和武炳义, 2019)。

另一方面,夏季北极大部分区域纬向西风的加强,对应加强的北极极涡,有利于夏季北极大部分区域大气斜压性和上升运动的加强。同时,北极大气环流的变化有利于北极对流层出现冷却,从而可能有利于减缓夏季北极的融化(Francis and Wu, 2020)。北极海冰强迫的数值模拟试验也表明,北极海冰融化异常可以加强夏季北极极涡和高纬度区域纬向西风,有利于北极对流层中、低层冷异常的出现(Wu and Li, 2021; Wu et al., 2023)。夏季北极对流层西风的加强不仅与东亚中纬度高温热浪发生频次有直接的动力联系,而且是预测后期东亚冬季风趋势的潜在前兆信号(Wu and Francis, 2019)。温室气体排放的增加导致全球增暖持续,由此引起北极海冰融化、夏季高温热浪的频繁出现(Sun et al., 2014),而这两者均与夏季北极冷异常有密切的关系,进而可能减缓了夏季北极海冰的融化。这也是9月北极海冰范围在2012年达到有观测记录以来的最小值后,再也没有出现新的低值记录的可能原因。但是,夏季北极对流层冷异常如何减缓北极海冰的融化过程和机理还需要进一步深入研究。

(3) 极端强降水事件

已有诸多研究探讨了北极海冰变化与夏季降水异常的可能联系,但关于北极海冰融化对夏季极端强降水的影响却并不多见。针对2020年夏季发生在长江流域和日本的强降水过程,有研究认为与北极海冰融化、北极增暖异常有关系(Chen et al., 2021; Nakamura and Sato, 2022)。Chen等(2021)认为,2020年晚春至早夏北极海冰异常偏少,通过影响南下冷空气活动,进而引发长江流域和日本的极端强降水过程。而其它研究则认为,2020年夏季长江流域的极端强降水过程与北大西洋涛动(Liu et al., 2020)、热带印度洋海表温度(Zhou et al., 2021)以及新冠疫情期间减排的突然减少有关系(Yang et al., 2022)。因此,夏季区域极端强降水的发生,是多种因素共同作用的结果。

2. 冬季北极-中纬度联系强弱的交替出现与北极海冰异常变化的联系

冬季北极接受的太阳辐射非常有限,由于强的辐射冷却作用,使得地表(海冰表面)温度低于周围大气温度,致使北极大部分区域成为大气环流的冷源区。由于大气冷源以及热成风关系,环绕极地冷源的西风加强,从而形成环绕北极区域的极涡。北极极涡的强度、位置以及极地低压的空间分布直接影响南下冷空气的路径和强度。冬季途径巴伦支海和途径喀拉海以东海域的冷空气,经常造成东亚寒潮天气过程。从天气尺度角度看,北极冷空气南下的过程,与乌拉尔阻塞高压加强、西伯利亚高压加强、东亚大槽加深、东亚中纬度对流层高层西风的加强,乃至热带对流活动的加强均有密切关系。此时,北极与中纬度区域的物质和能量交换活跃、偏强,即北极-中纬度联系偏强。

在年际变化时间尺度上,从上世纪 80 年代后期(1986 年)至本世纪初期(2003 年),冬季西伯利亚高压强度总体偏弱,对应我国暖冬频繁出现;在 2004-2012 年间,冬季西伯利亚高压的强度频繁转变为正常偏强,对应强东亚冬季风频繁出现(Wu et al., 2015,见该文中图 3)。因此,东亚中纬度区域冬季大气环流呈现明显的阶段性变化特征。北极 1000-500-hPa 大气厚度变率显示,1979/1980-2003/2004 年冬季北极对流层中、低层温度偏低,而此后(2004/2005-2015/2016 年冬季)则转变为偏暖阶段,这期间除 2013/2014-2014/2015 年两个冬季东亚为暖冬外,东亚冬季风偏强频繁出现(Wu, 2017,见该文中图 1)。利用美国(NCEP/NCAR)和日本(JRA-25)的再分析数据,Yang 和 Wu(2013)研究了东亚区域冬季平均表面气温的年代际变化的主要特征,揭示了冬季气温变率的第二模态在空间上呈现南北反向变化,该模态在上世纪 90 年代后期发生了年代际变化,即在 1997-2011 年间,东亚区域北(南)部冬季表面气温变得更冷(暖)。秋季北大西洋海表温度和北极海冰密集度也在上世纪 90 年代中、后期发生了年代际变化,即 1995 年以后北大西洋海温一致性升高,1996 年以后秋季北极海冰减少(Yang and Wu, 2013)。此外,夏季(7-9 月平均)北冰洋表面风场变率的优优势模态,也呈现明显的年代际变化,1997 年以前盛行的气旋性风场异常被 1997 年以后的反气旋风场异常所取代,该年代际变化与 9 月北极海冰范围的消融趋势是一致的(Wu et al., 2012)。Xu 等(2019)认为,冬季巴伦支-喀拉海表层增暖与西伯利亚高压之间关系有明显的阶段性变化特征:1979-1996(1997-2017)年

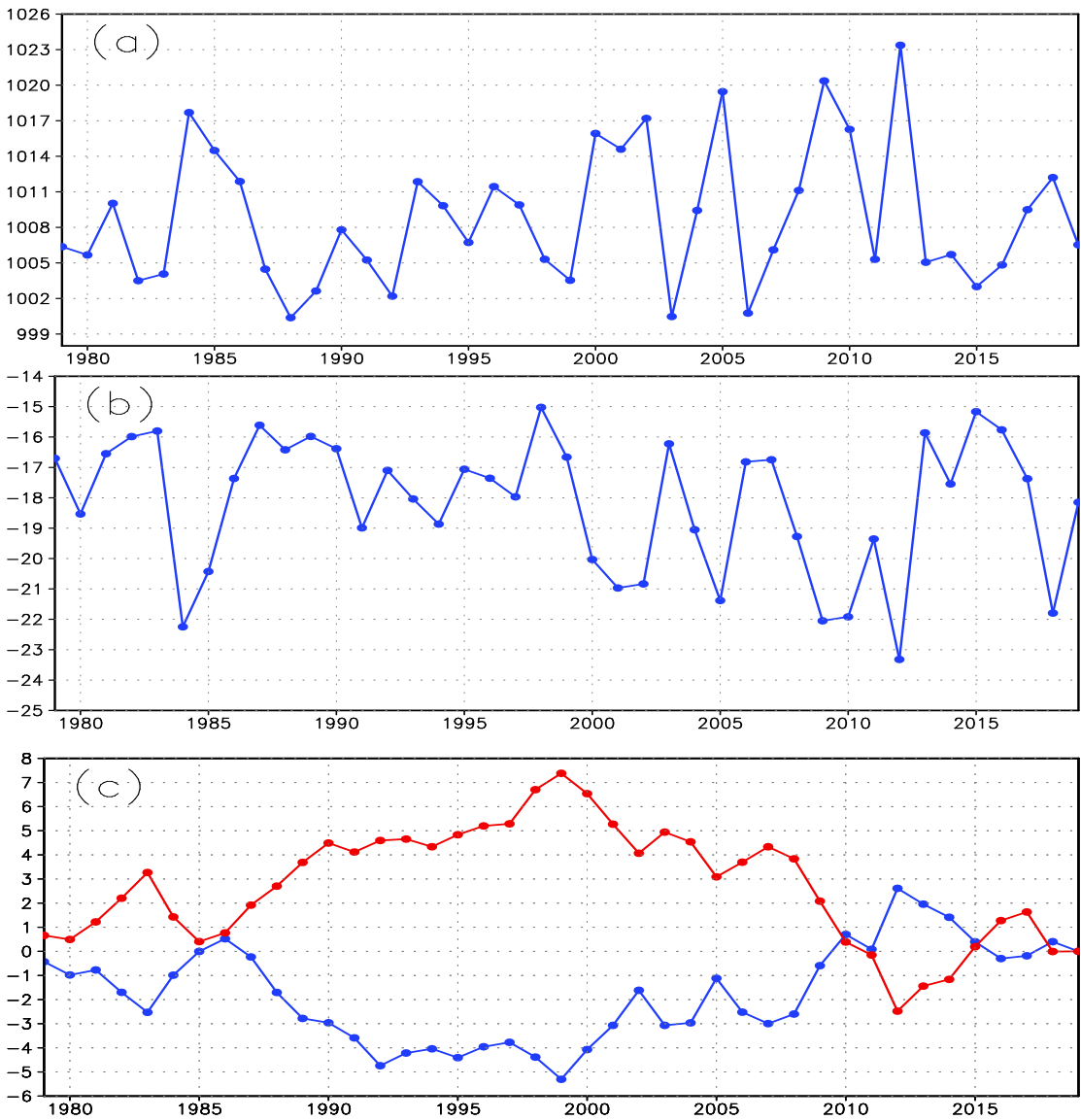
冬季北极增暖与西伯利亚高压联系偏弱（偏强）。他们认为，在 1997-2017 年冬季，当巴伦支-喀拉海表面气温异常偏高时，西伯利亚高压加强西伸，东亚急流加强西伸，北极对流层中、上层增暖是北极与中纬度加强联系的重要原因。上述研究清楚地说明，已有的关于北极-中纬度联系的研究，都是从气候系统自身的年代际变化着手（即发生在上世纪 90 年代后期和本世纪初期的年代际变化），而不是从它们之间关系的阶段性演变着手。因此，这些研究不仅没有如实地反映北极-中纬度联系的阶段性变化特征，而且可能会误导北极-中纬度之间的关系。

近期研究表明，冬季东亚对流层低层区域气温经历明显的阶段性变化特征（2007/2008-2012/2013 年冬季以及 2013/2014-2018/2019 年冬季），前一阶段呈现暖北极-冷欧亚气温分布，北极与亚洲的温度联系加强；而后一阶段则变为暖北极-暖欧亚温度空间格局，此时北极与亚洲气温的联系阶段性减弱（Wu et al., 2022）。这说明在北极海冰异常偏少、北极增暖依然持续的背景下，北极-中纬度区域之间联系的阶段性强、弱交替出现，并由此导致中纬度区域冬季气候异常潜在的可预测性降低。Smith 等（2022）分析发现，秋季北极海冰范围与冬季 NAO、平流层极涡强度的关系在 2012 年以后也减弱了（见该研究中图 9）。

由观测的北极海冰密集度强迫数值模拟试验，可以再现北极-欧亚中纬度联系强弱的阶段性变化的主要特征（Wu et al., 2022），冬季亚洲区域气温对北极海冰持续融化的响应有显著的低频振荡特征，从而证实了北极海冰在年代际变化中起重要作用（Kellogg, 1975; Maysak et al., 1990）。北极海冰融化对北极增暖异常有直接的贡献，同时，通过对流层负反馈、平流层-对流层相互作用以及其它未知机制，可以引起“暖北极-冷欧亚”气温异常分布。当北极海冰持续融化时，北极增暖的幅度和范围进一步增加和扩大，以至于正的温度异常从北极向南扩展至欧亚大陆高纬度区域，从而有利于产生“暖北极-暖欧亚”的气温异常。但是，有关北极海冰持续融化为什么可以产生类似 NAO 正位相的阶段性大气环流异常（见 Wu et al., 2022 中图 4），以及北极-中纬度联系的阶段性减弱机制尚不清楚。此时，北极海冰异常偏少引起的负反馈机制、平流层-对流层相互作用机制均不再起作用。

这里给出 12 月北极和亚洲大陆大气环流异常演变的阶段性特征及其与北极海冰异常的可能联系。图 1 显示，包括巴伦支-喀拉海在内的区域平均 SLP 与亚

洲区域平均表面气温呈反向变化关系（图 1 a， b），而它们的累计距平演变清晰地呈现阶段性特征（1 c）。在北极，区域平均 SLP 在 1999 年和 2012 年分别达到最小值和最大值；而亚洲区域平均气温则在 1999 年和 2012 年分别处于极大值和和极小值，因此，1999 年和 2012 年可以近似地作为 SLP 和表面气温阶段性变化的转换点。由此把整个研究时段分划为三个阶段：1979-1999 年（阶段 I），2000-2012 年（阶段 II）以及 2013-2019 年（阶段 III）。



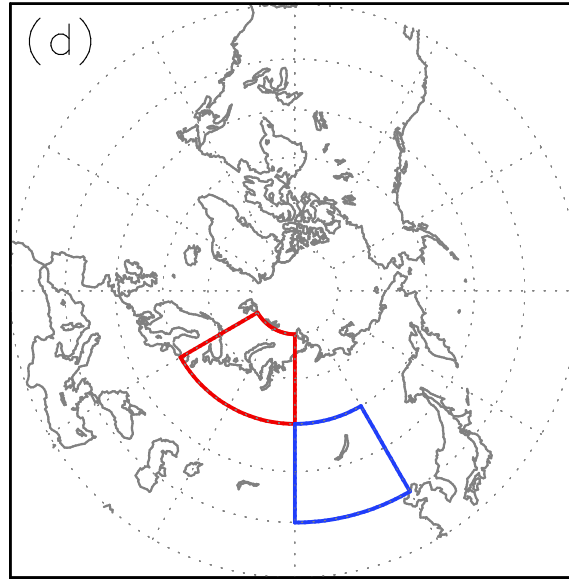


图 1 (a) 区域 (60° - 80° N, 30° - 90° E; 图 1d 中红线所围绕区域) 平均的 12 月海平面气压 (单位: 百帕) 年际变化。(b) 区域 (40° - 60° N, 90° - 120° E; 图 1d 中蓝线所围绕区域) 平均的 12 月表面气温 (单位: 度) 年际变化。(c) 标准化后的海平面气压 (蓝色) 和表面气温 (红色) 的累计偏差演变。(d) 红色和蓝色线所围绕区域表所选定的特定区域, 分别来计算区域平均海平面气压和表面气温。计算所用资料来自美国 NCEP/NCAR 再分析数据。

Fig. 1 (a) Interannual variations of the regionally (60° - 80° N, 30° - 90° E; red box in d) averaged SLP (hPa) in December. (b) As in (a), but for the regionally (40° - 60° N, 90° - 120° E; blue box in d) averaged SAT ($^{\circ}$ C). (c) Cumulative deviations of normalized December SLP averaged over red box in d and SAT averaged over blue box in d. (d) The red and green boxes represent boundaries of the two regions. Data are derived from NCEP/NCAR re-analysis I.

这三个不同阶段的表面气温和 SLP 异常呈现截然不同的空间分布特征 (图 2)。在第一阶段, 表面气温异常显示冷北极-暖亚洲空间格局 (图 2a)。表面气温负异常覆盖了北极、欧洲和北美区域, 其中最大负异常出现在巴伦支海。同时, 表面气温正异常出现在亚洲和东亚沿岸。与第一阶段的表面气温异常分布相反, 表面气温正异常覆盖了北冰洋和北美大陆大部分区域, 同时, 气温负异常占据欧亚大陆的大部分区域, 形成暖北极-冷欧亚空间分布 (图 2b)。在第三阶段, 气温正异常在高纬度区域进一步发展, 欧亚大陆大部分区域为气温正异常区域 (青藏高原和东亚小部分区域为气温负异常), 形成暖北极-暖欧亚空间分布 (图 2c)。

第一阶段的 SLP 负异常占据了欧亚大陆和北极的大部分区域, 而 SLP 正异常出现在亚洲中、低纬度区域, 西北太平洋以及北美大陆的大部分区域 (图 2d)。第二阶段的 SLP 异常几乎呈现相反的空间分布 (与第一阶段相比), SLP 正异常覆盖了大部分北极和欧亚大陆的中、高纬度区域 (图 2e), 因此加强的西伯利亚

高压与冷亚洲是动力一致的（图 2b）。在第三阶段，SLP 异常的空间结构类似正位相的北大西洋涛动，这期间北大西洋涛动指数平均值为 1.17。因此，北极暖异常与北大西洋涛动负位相没有必然的联系。

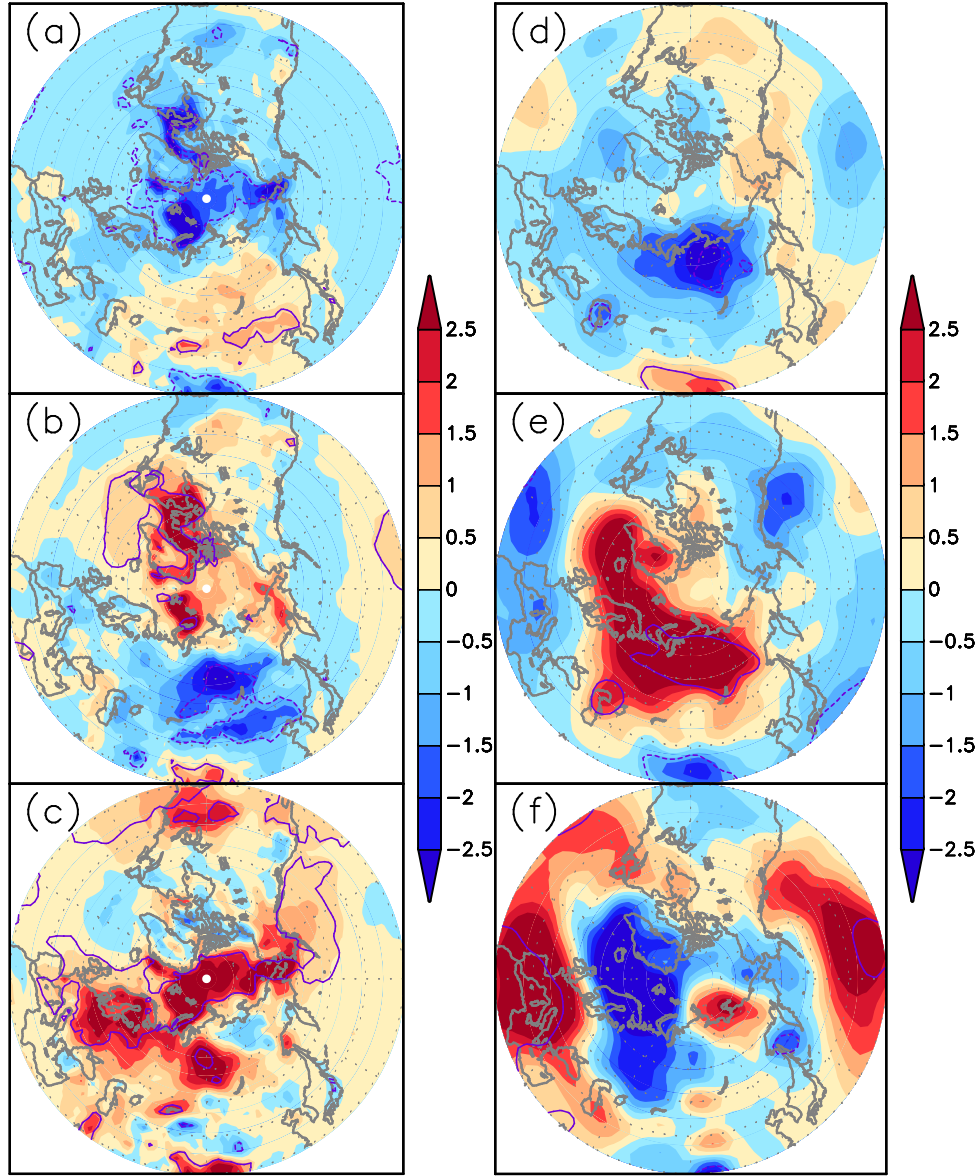
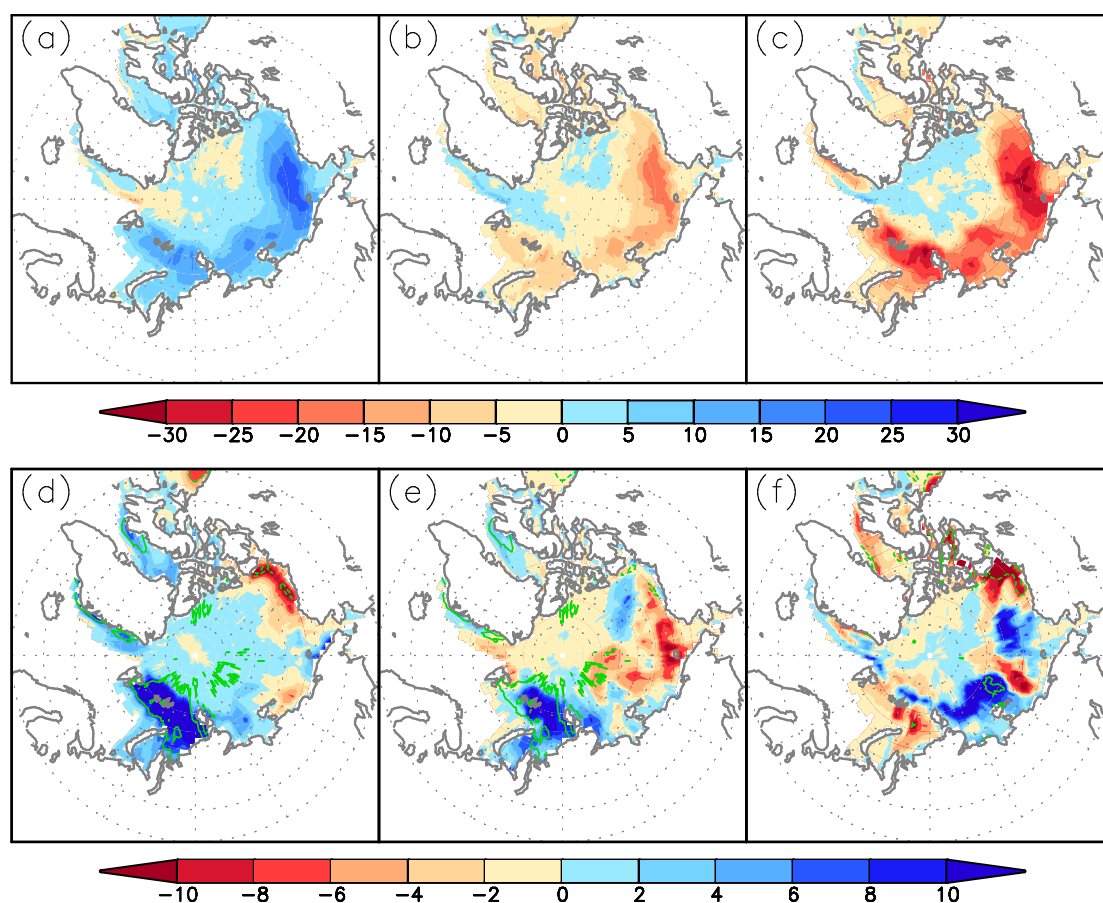


图 2 (a) 12 月表面气温异常的空间分布 (单位: 度), 由 1979-1999 年 (第一阶段) 12 月表面气温的平均值减去 1979-2019 年 12 月表面气温的平均值计算得到。(b) 和 (c) 与 (a) 类似, 但为 2000-2012 年以及 2013-2019 年阶段性平均气温异常。(d) - (f) 分别与 (a) - (c) 类似, 但为 12 月海平面气压异常的空间分布。图中紫色等值线表示异常在 0.05 置信水平。计算所用资料来自美国 NCEP/NCAR 再分析数据 I。

Fig. 2 (a) December SAT ($^{\circ}\text{C}$) anomalies, derived from the mean SAT over 1979-1999 (phase I) minus the mean over 1979-2019. (b) and (c) As in (a), but for 2000-2012 (phase II) and 2013-2019 (III), respectively. (d) - (f) As in (a) - (c), respectively, but for December SLP (hPa) anomalies. Purple contours denote anomalies at 0.05 confidence level. Data are derived from NCEP/NCAR re-analysis I.

秋季北极海冰密集度也呈现不同的空间分布和振幅异常（图 3a-c）。第一阶段对应北极海冰偏多时期，海冰密集度正异常覆盖了大部分北冰洋及其边缘海域，几乎与第二阶段的海冰密集度异常呈现相反的空间分布，更强的海冰融化出现在第三阶段。回归分析结果表明，在前两个阶段，亚洲区域表面气温正异常，均对应前期秋季巴伦支-喀拉海海冰的显著增加（图 3d,e）。第三阶段北极海冰与 12 月亚洲区域气温的关系明显减弱（与前两个阶段相比），特别是在巴伦支-喀拉海海域，该海域秋季海冰减少反而有利于东亚 12 月气温升高（图 3f）。秋季巴伦支-喀拉海海冰密集度与气温的演变曲线进一步证实了这一结论（图 3g）。



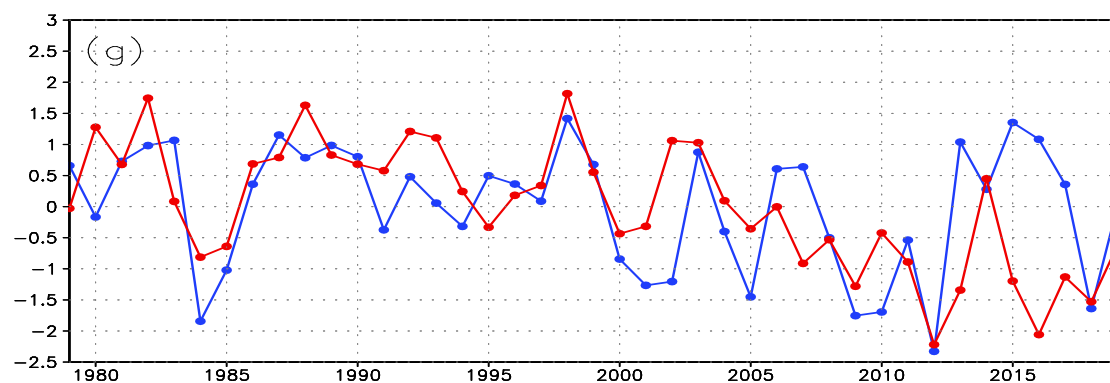


图 3 秋季阶段性平均海冰密集度异常（相对于 1979-2019 年的秋季平均值），(a) 1979-1999 年，(b) 2000-2012 年，(c) 2013-2019 年。不同时间段秋季海冰密集度异常的空间分布，由对标准化后的 12 月区域平均表面气温（图 1b）进行回归分析得到，(d) 1979-1999 年，(e) 2000-2012 年，(f) 2013-2019 年，绿色等值线表示海冰密集度异常在 0.05 置信水平。在回归分析前，北极海冰和表面气温资料均进行了去趋势计算。(g) 标准化后的区域（图 1d 中蓝色线所围绕区域）平均表面气温（蓝色）与前期秋季巴伦支-喀拉海海域（70.5°-83.5°N, 20.5°-90.5°E）平均海冰密集度（红色）演变曲线，去掉趋势后 1979-2019 年（1979-2012 年）它们之间的相关系数是 0.37 (0.59)。计算所用资料来自美国 NCEP/NCAR 再分析数据 I 和英国大气数据中心。

Fig. 3 Autumn (SON) mean SIC anomalies (%) averaged over (a) 1979-1999, (b) 2000-2012, and (c) 2013-2019, relative to the autumn mean averaged over 1979-2019. Autumn mean SIC anomalies, derived from a linear regression on normalized regionally (blue box in **Fig. 1d**) averaged December SAT for (d) 1979-1999 (phase I), (e) 2000-2012 (phase II), and (f) 2013-2019 (phase III), the green contours denote SIC anomalies at 0.05 confidence level. All data have been detrended over 1979-2019 before regression analysis. (g) Normalized regionally (blue box in **Fig. 1d**) averaged December SAT (blue line) and regionally (70.5°-83.5°N, 20.5°-90.5°E) averaged SIC in the previous autumn (red line), their correlation after detrending is 0.37 (0.59) for the period 1979-2019 (1979-2012). Data are derived from NCEP/NCAR re-analysis I and the British Atmospheric Data Centre.

3. 夏季北极海冰异常变化与中国夏季降水变化的联系

长期以来，关于北极海冰异常及其与我国降水变化的关系，也是人们重点关注的问题之一（Wu et al., 2023）。近年来，一些观测研究强调了巴伦支-喀拉海海冰异常在导致东亚降水异常中所起的重要作用（Shen et al., 2019; Zhang et al., 2021; Yang et al., 2022; Du et al., 2022）。Shen 等（2019）发现，夏季巴伦支海海冰融化与中国中部和东南部夏季降水异常关系密切。而春季巴伦支海海冰与 5-6 月东北亚降水变化有关系（Zhang et al., 2021）。通过复杂的冰-气相互作用和平流层-对流层相互作用，Yang 等（2022）指出，晚秋至早冬巴伦支-喀拉海海冰异常可以影响后期 6 月中国区域降水变化。最新研究表明，在北极海冰融化阶段，尽管夏季高纬度大气环流异常是显著的，但其对华北夏季降水几乎没有影响；数值模拟

试验结果也表明，夏季北极海冰融化异常对华北夏季降水影响有限，其对长江流域和华南夏季降水没有影响（Wu et al., 2023）。

4. 讨论

本小节重点讨论当前研究中备受关注的几个焦点问题：（1）极端天气事件与北极海冰异常变化的联系；（2）大气内部变率与北极海冰变化的影响；（3）北极海冰异常与天气过程和短期气候趋势预测；（4）暖北极-冷欧亚与北极海冰异常变化的关系。这几个问题在逻辑上是有内在联系的，它们都涉及北极海冰异常强迫与大气内部变率的区分，以及它们在极端事件和气候变率中的不同作用。

（1）极端天气事件与北极海冰异常变化的联系

相对于北极海冰，大气变化属于快变过程，而气温的快变过程在北极地区尤为突出（1 克 0 摄氏度的冰融化变成 0 摄氏度的水需要吸收 80 卡的热量，而 1 克大气升高 1 摄氏度需要热量仅为 0.24 卡）。因此，研究北极海冰的影响，更要关注其对大气低频变化的影响（季节内和年际低频变化）。而中纬度极端天气事件多属于天气尺度的快变过程，形成机制很难归咎于单一因子，同时揭示多种因素的共同影响又过于笼统，因此需要定量化研究北极海冰融化在极端天气和气候事件中的贡献。

（2）大气环流内部变率与北极海冰异常变化的影响

许多研究都明确指出，大气环流对北极海冰强迫的响应小于大气内部变率，由此得出北极海冰变化的影响是次要的，甚至否定其在天气和气候变率中的作用。一个突出的例子就是在欧亚大陆冬季降温趋势与北极海冰融化是否存在因果联系。一部分研究认为，北极海冰融化对冬季欧亚大陆降温趋势有因果联系（如 Cohen et al., 2016），而另外一些研究把降温趋势归结于大气内部变率（如 Warner et al., 2020）。但我们无法区分大气环流内部变率与海冰外强迫的影响，它们已经深度融合在一起。因此，把冬季欧亚大陆的降温趋势归结为北极海冰融化和内部大气变率的共同影响更合理（Outten et al., 2023）。在研究中，区分北极海冰异常的强迫作用与大气内部变率的不同，已无实际意义。

（3）北极海冰与东亚极端天气过程和短期气候趋势预测

已有很多研究涉及到利用北极海冰异常来预测极端天气和短期气候趋势预

测 (Wang et al., 2017; Dai and Mu, 2020; Zhang et al., 2020; Ma et al., 2022; Wu and Yu, 2023)。秋季北极海冰不仅是预测冬季北大西洋涛动强度的因子之一 (Wang et al., 2017), 也是预测东亚冬季风的前兆信号 (Zhang et al., 2020)。如前文所述, 由于北极海冰对欧亚大陆冬季气温的影响受控于诸多因素, 为降低秋季北极海冰对后期冬季东亚气温影响的不确定性, 在考虑北极海冰异常偏少的情况下, 往往同时参考大气初值条件的影响 (Wu et al., 2016; Dai and Mu, 2020; Yu and Wu, 2023)。Ma 等 (2022) 将条件非线性最优边界扰动方法运用到复杂大气环流模式 (CAM4) 中, 通过数值求解北极海冰密集度影响冬季乌拉尔阻塞事件的非线性最优化问题, 从次季节尺度研究了北极海冰对乌拉尔阻塞事件可预报性的影响。他们研究发现, 在超前乌拉尔阻塞形成前的第 4 候, 使得乌拉尔阻塞的预报具有最大不确定性的海冰密集度扰动主要集中在格陵兰海、巴伦支海和鄂霍次克海, 海冰通过一系列复杂过程最终影响第 4 候乌拉尔阻塞的形成。但是, 由于极端天气和气候预测的复杂性, 以及考虑到冬季北极-东亚气温联系强弱与北极海冰融化关系的阶段性变化等影响, 利用北极海冰预测天气事件和气候趋势依然面临巨大挑战。

(4) 暖北极-冷欧亚与北极海冰异常变化的关系

自从 Overland 等 (2011) 通过个例分析提出暖北极-冷大陆的概念之后, 已有大量研究探讨了暖北极-冷欧亚大气环流异常变化的主要特征和可能的形成机理, 尽管对北极海冰的影响仍有争论, 但主要结论是北极海冰融化不仅对北极增暖异常有贡献, 也是引起欧亚大陆冷异常和降温趋势的原因之一。近期研究对暖北极-冷欧亚形成提出了不同的解释 (Wu and Ding, 2022): 冬季欧亚大陆区域冷异常对北极增暖有贡献, 在合适的条件下, 欧亚大陆的区域冷异常可以加强冬季西伯利亚高压、导致乌拉尔山附近区域的反气旋环流发展, 进而引起巴伦支-喀拉海异常偏暖。观测分析显示, 冬季巴伦支-喀拉海异常偏暖不仅取决于 NAO 正位相的强度, 而且与西伯利亚高压的加强有直接关系。冬季加强的西伯利亚高压对应北半球中、高纬度大气环流的系统性北移, 是引起巴伦支-喀拉海增暖异常的直接原因。秋季北极海冰异常偏少很可能通过影响冬季西伯利亚高压, 进而引起巴伦支-喀拉海异常偏暖。

在冬季季节内时间尺度上, 源自北大西洋区域的大气低频变化可以加强乌拉

尔山附近的反气旋性环流异常，滞后 1-2 天该异常反气旋可以引起巴伦支-喀拉海异常偏暖，通过海-冰-气相互作用过程，进一步加强了乌拉尔山附近的反气旋性环流异常，几天以后异常反气旋引起欧亚大陆的冷异常（Nie et al., 2022）。Peings 等（2023）认为，巴伦支-喀拉海海冰可以调节大气环流对乌拉尔阻塞的响应，海冰偏少有利于更持久的响应。该研究表明，在季节内时间尺度上，冬季巴伦支-喀拉海异常偏暖依然与中、高纬度系统加强有直接的关系，巴伦支-喀拉海海冰异常偏少则加强了乌拉尔山附近的异常反气旋。相反的观点则认为，冬季巴伦支-喀拉海温度超前乌拉尔山附近阻塞高压异常 1-2 天，后者再引起欧亚大陆的冷异常（Luo et al., 2016; Kim et al., 2021）。因此，在冬季季节内时间尺度上，西伯利亚高压、乌拉尔山附近阻塞高压异常以及北极增暖异常之间因果关系链条依然不是很清晰明确，北极海冰异常在其中所起的作用也亟需进一步研究。

5. 结论

近期(2018-2023)北极-中纬度联系与北极海冰异常变化的关系研究新进展，可以概括总结为以下六个方面：（1）对北极海冰异常变化在欧洲极端降雪个例中的贡献有了实质性的认识。通过对大气中水蒸气同位素的测量和分析，揭示了巴伦支海海冰融化通过向大气输送更多的水蒸气，导致欧洲 2018 年 2 月出现极端降雪事件。这是以往研究提出的北极海冰影响大气环流的机制所无法解释的；（2）冬季亚洲区域气温对北极海冰持续融化的响应有显著的低频振荡特征。北极海冰持续融化有利于冬季暖北极-冷欧亚(2004/05-2012/13)和暖北极-暖欧亚(2013/14-2016/17)交替出现，与暖北极-冷欧亚阶段相比，暖北极-暖欧亚阶段北极与东亚中纬度的联系减弱了；（3）东亚中、低纬度区域夏季高温热浪极端天气事件与同期北极对流层冷异常有直接的动力联系，夏季北极对流层冷异常不仅有利于减缓北极海冰融化，而且成为预测后期东亚冬季风趋势的前兆因子；（4）北极夏季海冰融化异常，对我国华北以南区域夏季降水并无实质性影响；（5）北极海冰融化异常通过平流层过程影响中纬度区域的不确定性大于对流层过程；（6）区分大气内部变率与北极海冰强迫在天气事件和气候变率中的不同作用已无实际意义。

未来关注北极海冰异常融化的影响时，更应注重其在大气环流低频变化中的作用，以及北极海冰异常空间分布差异和不同异常振幅的影响，同时需要量化

研究北极海冰融化在极端天气和气候事件中的作用。

参考文献

- Alexander M A, Bhatt U S, Walsh J E, et al. 2004. The atmospheric response to realistic Arctic sea ice anomalies in an AGCM during winter [J]. *J. Clim.*, 17(5): 890-905. doi:10.1175/1520-0442(2004)017%3C0890:TARTRA%3E2.0.CO;2
- Bailey H, Hubbard A, Klein E S, et al. 2021. Arctic sea-ice loss fuels extreme European snowfall [J]. *Nature Geosci.*, 14(5): 283-288. doi:10.1038/s41561-021-00719-y
- Blackport R, Screen J A, van der Wiel K, et al. 2019. Minimal influence of reduced Arctic sea ice on coincident cold winters in mid-latitudes [J]. *Nat. Clim. Change*, 9(9): 697-704. doi:10.1038/s41558-019-0551-4
- Chen X, Dai A, Wen Z, et al. 2021. Contributions of Arctic sea-ice loss and East Siberian atmospheric blocking to 2020 record-breaking Meiyu-Baiu rainfall [J]. *Geophysical Research Letters*, **48**, e2021GL092748. <https://doi.org/10.1029/2021GL092748>
- Cohen J. 2016. An observational analysis: tropical relative to Arctic influence on midlatitude weather in the era of Arctic amplification [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 43(10): 5287-5294. doi:10.1002/2016GL069102
- Cohen J Pfeiffer K, Francis J A, 2018. Warm Arctic episodes linked with increased frequency of extreme winter weather in the United States [J]. *Nature communications*, 9(1): 869. doi:10.1038/s41467-018-02992-9
- Cohen J, Agel L, Barlow M, et al. 2021. Linking Arctic variability and change with extreme winter weather in the United States [J]. *Science*, **373** 1116–21. DOI: 10.1126/science.abi9167
- Dai G K, Mu M. 2020. Influence of the Arctic on the Predictability of Eurasian Winter Extreme Weather Events [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 37(4): 307-317. doi:10.1007/s00376-019-9222-7
- Davis N A, Richter J H, Glanville A A, et al. 2022. Limited surface impacts of the January 2021 sudden stratospheric warming [J]. *Nature communications*, 13(1): 1136. doi:10.1038/s41467-022-28836-1
- Deser C, Magnusdottir G, Saravanan R, et al. 2004. 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]. *J. Clim.*, 17(5): 877-889. doi:10.1175/1520-0442(2004)017%3C0877:TEONAS%3E2.0.CO;2
- Ding S, Wu B, Chen W, 2021. Dominant characteristics of early Autumn Arctic sea ice variability and its impact on winter Eurasian climate [J]. *Journal of Climate*, 34(5):1825-1846. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0834.1>

- Du Y, Zhang J, Zhao S, et al. 2022. A mechanism of spring Barents sea ice effect on the extreme summer droughts in northeastern China [J]. *Climate Dynamics*, **58**, 9. doi:10.1007/s00382-021-05949-9
- Fletcher J O. 1968. The influence of Arctic pack ice on climate [J]. *Meteor. Monogr.*, **30**: 93-99.
- Fletcher J O, et al. 1971. Numerical simulation of the influence of Arctic sea ice on climate, WMO Tech. Note, No.129, Proc. IAMAP/IAPSON/WMO, Symp. Energy fluxes over polar surface, Moscow
- Francis J, Wu B, 2020. Why has no new record-minimum Arctic sea-ice extent occurred since September 2012?[J]. *Environmental Research Letters*, **15**(11), 114034, 10.1088/1748-9326/abc047
- Jaiser R, Dethloff K, Handorf D. 2013. Stratospheric response to Arctic sea ice retreat and associated planetary wave propagation changes [J]. *Tellus A*, **65**(1): 19375. doi:10.3402/tellusa.v65i0.19375
- Kellogg W, 1975. Climatic feedback mechanisms involving the polar regions *Climate of the Arctic*, Geophys. Inst., Univ. Of Alaska (Fairbanks, AL: Geophysical Institute, University of Alaska) ed G Weller and S A Bowling pp 111–6
- Kretschmer M, Coumou D, Agel L, et al. 2018. More-persistent weak stratospheric polar vortex states linked to cold extremes [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **99**(1): 49-60. doi:10.1175/BAMS-D-16-0259.1
- Kim H, Son S, Moon W, et al. 2021. Subseasonal relationship between Arctic and Eurasian surface air temperature [J]. *Sci. Rep.*, **11**, 4081, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83486-5>.
- Liu B, Yan Y, Zhu, C, et al. 2020. Record-breaking Meiyu rainfall around Yangtze River in 2020 regulated by the subseasonal phase transition of North Atlantic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.* doi: 10.1029/2020GL090342
- Luo B H, Luo D H, Dai A G, et al. 2021. A connection of winter Eurasian cold anomaly to the modulation of Ural blocking by ENSO [J]. *Geophys. Res. Lett.*, **48**(17): e2021GL094304. doi:10.1029/2021gl094304
- Luo D H, Chen X D, Overland J, et al. 2019. Weakened potential vorticity barrier linked to recent winter Arctic sea ice loss and midlatitude cold extremes [J]. *J. Clim.*, **32**(14): 4235-4261. doi:10.1175/JCLI-D-18-0449.1
- Luo D H, Yao Y, Dai A G, et al. 2017. Increased quasi stationarity and persistence of winter Ural blocking and Eurasian extreme cold events in response to Arctic warming. Part II: a theoretical explanation [J]. *J. Clim.*, **30**(10): 3569-3587. doi:10.1175/JCLI-D-16-0262.1
- Luo D H, Xiao Y, Yao Y, et al. 2016. Impact of Ural blocking on winter warm Arctic-cold Eurasian anomalies. Part I: blocking-induced amplification [J]. *J. Climate*, **29**, 3925-3947, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0611.1>.
- Ma X Y, Mu M, Dai G K, et al. 2022. Influence of Arctic sea ice concentration on extended-range prediction of strong and long-lasting Ural blocking events in winter [J]. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, **127**(5): e2021JD036282. doi:10.1029/2021JD036282
- McKenna C M, Bracegirdle T J, Shuckburgh E F, et al. 2018. Arctic sea ice loss in

- different regions leads to contrasting Northern Hemisphere impacts [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 45(2): 945-954. doi:[10.1002/2017GL076433](https://doi.org/10.1002/2017GL076433)
- Mori M, Kosaka Y, Watanabe M, et al. 2019. A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling [J]. *Nat. Clim. Change*, 9(2): 123-129. doi:[10.1038/s41558-018-0379-3](https://doi.org/10.1038/s41558-018-0379-3)
- Mysak L A, Manak D K, Marsden R F, 1990. Sea-ice anomalies observed in the Greenland and Labrador Seas during 1901–1984 and their relation to an interdecadal Arctic climate cycle [J]. *Clim. Dyn.* 5 111–33.
- Nakamura T, Sato T, 2022. A possible linkage of Eurasian heat wave and East Asian heavy rainfall in relation to the rapid Arctic warming [J]. *Environmental Research*, 112881. DOI:[10.1016/j.envres.2022.112881](https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112881)
- Newson R L. 1973. Response of a general circulation model of the atmosphere to removal of the Arctic ice-cap [J]. *Nature*, 241(5384): 39-40. doi:[10.1038/241039b0](https://doi.org/10.1038/241039b0)
- Nie Y, Ren H, Zhang Y, et al. 2022. Roles of atmospheric variability and Arctic sea ice in the asymmetric Arctic-Eurasia temperature connection on subseasonal time scale [J]. *Journal of Climate*, 35, 3975-3993. DOI:[10.1175/JCLI-D-21-0771.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0771.1)
- Ogawa F, Keenlyside N, Gao Y Q, et al. 2018. Evaluating impacts of recent Arctic sea ice loss on the northern hemisphere winter climate change [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 45(7): 3255-3263. doi:[10.1002/2017GL076502](https://doi.org/10.1002/2017GL076502)
- Outten S, Li C, King M P, et al. 2023. Reconciling conflicting evidence for the cause of the observed early 21st century Eurasian cooling [J]. *Weather Clim. Dyn.*, 4(1): 95-114. doi:[10.5194/wcd-4-95-2023](https://doi.org/10.5194/wcd-4-95-2023)
- Overland J E, Wood K R, Wang M Y. 2011. Warm Arctic–cold continents: Climate impacts of the newly open Arctic Sea [J]. *Polar Res.*, 30(1): 15787. doi:[10.3402/polar.v30i0.15787](https://doi.org/10.3402/polar.v30i0.15787)
- Overland J E, Ballinger T J, Cohen J, et al. 2021. How do intermittency and simultaneous processes obfuscate the Arctic influence on midlatitude winter extreme weather events? [J]. *Environ. Res. Lett.*, 16(4): 043002. doi:[10.1088/1748-9326/abdb5d](https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdb5d)
- Peings Y. 2019. Ural blocking as a driver of early-winter stratospheric warmings [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 46(10): 5460-5468. doi:[10.1029/2019GL082097](https://doi.org/10.1029/2019GL082097)
- Perlwitz J, Hoerling M, Dole R. 2015. Arctic tropospheric warming: Causes and linkages to lower latitudes [J]. *J. Clim.* 28(6): 2154-2167. doi:[10.1175/JCLI-D-14-00095.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00095.1)
- Peings Y, Davini P, Magnusdottir G, 2023. Impact of Ural blocking on early winter climate variability under different Barents-Kara sea ice conditions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 128, e2022JD036994. <https://doi.org/10.1029/2022JD036994>
- Peings Y, Magnusdottir G, 2014. Response of the wintertime Northern Hemisphere atmospheric circulation to current and projected Arctic sea ice decline: A numerical study with CAM5 [J]. *J. Climate*, 27, 244–264. <https://doi.org/10.1175/JCLID-13-00272.1>

- Petoukhov V, Semenov V, 2010. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents [J]. *J. Geophys. Res.*, **115**, D21111. doi:10.1029/2009JD013568
- Ronalds B, Barnes E A, Eade R, et al. 2020. North Pacific zonal wind response to sea ice loss in the Polar Amplification Model Intercomparison Project and its downstream implications [J]. *Clim. Dyn.*, 55(7): 1779-1792. doi:10.1007/s00382-020-05352-w
- Royer J F, Planton S, Deque M, 1990. A sensitivity experiment for the removal of Arctic sea ice with the French spectral general circulation model [J]. *Clim. Dyn.*, 5(1): 1-17. doi:10.1007/BF00195850
- Rudeva I, Simmonds I, 2021. Midlatitude winter extreme temperature events and connections with anomalies in the Arctic and tropics [J]. *Journal of Climate*, 34, 3733-3749. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0371.1>
- Sato K, Inoue J, Watanabe M, 2014. Influence of the Gulf Stream on the Barents sea ice retreat and Eurasian coldness during early winter [J]. *Environ. Res. Lett.*, **9**(8), 084009. doi:10.1088/1748-9326/9/8/084009
- Screen J A, Simmonds I, Deser C, et al. 2013. The Atmospheric response to three decades of observed Arctic sea ice loss [J]. *J. Clim.* 26(4): 1230-1248. doi:10.1175/JCLI-D-12-00063.1
- Screen J A, Deser C, Simmonds I, et al. 2014. Atmospheric impacts of Arctic sea-ice loss, 1979–2009: separating forced change from atmospheric internal variability [J]. *Clim. Dyn.*, 43(1): 333-344. doi:10.1007/s00382-013-1830-9
- Screen J A, Deser C, Smith D M, et al. 2018. Consistency and discrepancy in the atmospheric response to Arctic sea-ice loss across climate models [J]. *Nat. Geosci.*, 11(3): 155-163. doi:10.1038/s41561-018-0059-y
- Screen J, Francis J, 2016. Contribution of sea-ice loss to Arctic amplification is regulated by Pacific Ocean decadal variability [J]. *Nat. Climate Change*, **6**, 856–860. doi:10.1038/nclimate3011
- Shen H, He S, Wang H, 2019. Effect of Summer Arctic Sea Ice on the Reverse August Precipitation Anomaly in Eastern China between 1998 and 2016 [J]. *Journal of Climate*, **32**, 3389-3406. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0615.1>
- Semenov V A, Latif M, 2015. Nonlinear Winter Atmospheric Circulation Response to Arctic Sea Ice Concentration Anomalies for Different Periods during 1966-2012 [J]. *Environmental Research Letters*, 10(5), 054020. DOI 10.1088/1748-9326/10/5/054020
- Siew P Y F, Li C, Sobolowski S P, et al. 2020. Intermittency of Arctic–mid-latitude teleconnections: stratospheric pathway between autumn sea ice and the winter North Atlantic Oscillation [J]. *Weather Clim. Dyn.*, 1(1): 261-275. doi:10.5194/wcd-1-261-2020
- Simon A, Frankignoul C, Gastineau G, et al. 2020. An observational estimate of the direct response of the cold-season atmospheric circulation to the Arctic Sea Ice Loss [J]. *J. Clim.*, 33(9): 3863-3882. doi:10.1175/JCLI-D-19-0687.1

- Smith D M, Screen J A, Deser C, et al. 2019. The Polar Amplification Model Intercomparison Project (PAMIP) contribution to CMIP6: investigating the causes and consequences of polar amplification [J]. *Geosci. Model Dev.*, 12(3): 1139-1164. doi:10.5194/gmd-12-1139-2019
- Smith D M, Eade R, Andrews M B, et al. 2022. Robust but weak winter atmospheric circulation response to future Arctic sea ice loss [J]. *Nature Communications*, 13, 727. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28283-y>
- Sun Y, Zhang X B, Zwiers F W, et al. 2014. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China [J]. *Nat. Clim. Change*, 4(12): 1082-1085. doi:10.1038/nclimate2410
- Tang Q, Zhang X, Francis J, 2014. Extreme summer weather in northern mid-latitudes linked to a vanishing cryosphere [J]. *Nat. Clim. Change*, 4(1): 45-50. doi:10.1038/nclimate2065
- Tian W S, Huang J L, Zhang J K, et al. 2023. Role of Stratospheric Processes in Climate Change: Advances and Challenges [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 1-22. doi:10.1007/s00376-023-2341-1
- Vokhmyanin M, Asikainen T, Salminen A, et al. 2023. Long-term prediction on Sudden Stratospheric Warmings with Geomagnetic and Solar Activity [J]. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 128(6): e2022JD037337. doi:10.1029/2022JD037337
- Wang L, Ting M, Kushner P J. 2017. A robust empirical seasonal prediction of winter NAO and surface climate [J]. *Sci. Rep.*, 7(1): 279. doi:10.1038/s41598-017-00353-y
- Warner J L, Screen J A, Scaife A. 2020. Links between Barents-Kara sea ice and the extratropical atmospheric circulation explained by internal variability and tropical forcing [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 47(1): e2019GL085679. doi:10.1029/2019GL085679
- Warshaw M, Rapp R. 1973. An experiment on the sensitivity of a global acidulation model [J]. *J. Appl. Meteor.*, 12: 43-49.
- Wu B, Su J, Zhang R, 2011. Effects of autumn–winter arctic sea ice on winter Siberian high [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 56(30): 3220-3228. doi:10.1007/s11434-011-4696-4
- Wu B, Overland J, D'Arrigo R, 2012. Anomalous Arctic surface wind patterns and their impacts on September sea ice minima and trend [J]. *Tellus*, 64, 18590. doi:10.3402/tellusa.v64i0.18590
- Wu B, Yang K, Francis J, 2016. Summer Arctic dipole wind pattern affects the winter Siberian High [J]. *International Journal of Climatology*, **36**, 4187-4201. doi:10.1002/joc.4623
- Wu B, 2017. Winter atmospheric circulation anomaly associated with recent Arctic winter warm anomalies [J]. *Journal of Climate*, **30**, 8469-8479.
- Wu B, Su J, D'Arrigo R, 2015. Patterns of Asian winter climate variability and links to Arctic sea ice [J]. *Journal of Climate*, 28, 6841-6858. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00274.1
- Wu B, Yang K, Francis J, 2017. A Cold Event in Asia during January-February 2012 and its possible association with Arctic sea-ice loss [J]. *Journal of Climate*, **30**,

7971-7990.

- Wu B, Francis J, 2019. Summer Arctic cold anomaly dynamically linked to East Asian heat waves [J]. *Journal of Climate*, 32(4), 1137–1150.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0370.1>
- Wu B, Li Z, 2021. Possible impacts of anomalous Arctic sea ice melting on summer atmosphere[J]. *International Journal of Climatology*.
<https://doi.org/10.1002/joc.7337>
- Wu B, Li Z, Francis J, et al. 2022. A recent weakening of winter temperature association between Arctic and Asia [J]. *Environmental Research Letters*, 034030,
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4b51>
- Wu B, Ding S, 2022. Cold-Eurasia contributes to arctic warm anomalies [J]. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06445-4>
- Wu B, Li Z, Zhang X, et al. 2023. Has Arctic sea ice loss affected summer precipitation in North China?[J]. *International Journal of Climatology* (with a minor revision).
- Xu X, He S, Gao Y, et al. 2019. Strengthened teleconnection between midlatitudes and Arctic in boreal winter. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04764-7>
- Yao Y, Zhuo W Q, Gong Z H, et al. 2023. Extreme Cold Events in North America and Eurasia in November-December 2022: A Potential Vorticity Gradient Perspective [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 1-10. [doi:10.1007/s00376-023-2384-3](https://doi.org/10.1007/s00376-023-2384-3)
- Yang H, Rao J, Chen H, 2022. Possible lagged impact of the Arctic sea ice in Barents-Kara Seas on June precipitation in Eastern China [J]. *Frontiers in Earth Science*. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.886192>
- Yang L, Wu B, 2013. Interdecadal variations of the East Asian winter surface air temperature and possible causes. *Chin. Sci. Bull.*, 58, 3969–3977.
[doi:10.1007/s11434-013-5911-2](https://doi.org/10.1007/s11434-013-5911-2)
- Yang Y, Ren L, Wu M, et al. 2022. Abrupt emissions reductions during COVID-19 contributed to record summer rainfall in China [J]. *Nat Commun.*, **13**, 959.
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-28537-9>.
- Yu Q, Wu B, 2023. Summer Arctic atmospheric circulation and its association with the ensuing East Asian Winter Monsoon variability [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2022JD037104.
<https://doi.org/10.1029/2022JD037104>
- Zhang J K, Tian W S, Pyle J A, et al. 2022. Responses of Arctic sea ice to stratospheric ozone depletion [J]. *Science Bulletin*, 67(11): 1182-1190.
[doi:10.1016/j.scib.2022.03.015](https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.03.015)
- Zhang P F, Wu Y T, Simpson I R. 2018. A stratospheric pathway linking a colder Siberia to Barents-Kara Sea sea ice loss [J]. *Sci. Adv.* 4(7): eaat6025.
[doi:10.1126/sciadv.aat6025](https://doi.org/10.1126/sciadv.aat6025)
- Zhang P F, Chen G, Ting M F, et al. 2023. More frequent atmospheric rivers slow the seasonal recovery of Arctic sea ice [J]. *Nat. Clim. Change*, 1-8.
[doi:10.1038/s41558-023-01599-3](https://doi.org/10.1038/s41558-023-01599-3)
- Zhang P, Wu Z W, Li J P, et al. 2020, Seasonal prediction of the northern and southern

- temperature modes of the East Asian winter monsoon: the important of the Arctic sea ice [J]. *Climate Dyn.*, 54(7): 3583-3597. doi:10.1007/s00382-020-05182-w
- Zhang P, Wu Z, Jin R, 2021. How can the winter North Atlantic Oscillation influence the early summer precipitation in Northeast Asia: effect of the Arctic sea ice [J]. *Climate Dynamics*, **56**, 1989–2005. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05570-2>.
- Zhou Z, Xie S, Zhang R, 2021. Historic Yangtze flooding of 2020 tied to extreme Indian Ocean conditions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118**, 12, e2022255118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2022255118>
- Zou Y F, Wang Y H, Zhang Y Z, et al. 2017. Arctic sea ice, Eurasia snow, and extreme winter haze in China [J]. *Sci. Adv.*, 3(3): e1602751. doi:10.1126/sciadv.1602751
- 董晓尧, 武炳义, 2019. 江淮地区夏季高温事件与北极冷异常的动力联系[J]. *应用气象学报*, 30 (4): 431–442. 10.11898/1001-7313.20190404

Recent Progresses in the study on Arctic-midlatitude connection and its association with Arctic sea ice loss

Wu Bingyi

Department of Atmospheric and Oceanic Sciences/Institute of Atmospheric Sciences,
Fudan University, Shanghai 200438

Key Laboratory of Coupled Ocean-Ice-Atmosphere System and Weather and Climate,
Ministry of Education, Shanghai 200438

Abstract:

This paper provides an overview of recent (2018-2023) progresses in the research filed of the Arctic-Eurasian midlatitude linkage and its association with Arctic sea ice loss. The progress includes the following aspects: (1) There is a substantial understanding of the contribution of Arctic sea ice melting in an extreme snowfall event in Europe, which cannot be explained by the mechanism that Arctic sea ice variations affect atmospheric circulation proposed in previous studies. (2) The response of winter Asian regional temperatures to the continuous melting of Arctic sea ice exhibits significant low-

frequency oscillation characteristics. The continuous melting of Arctic sea ice is conducive to the alternating occurrence of warm Arctic-cold Eurasia (2004/05-2012/13) and warm Arctic-warm Eurasia (2013/14-2016/17). In the warm Arctic-cold Eurasia phase, the enhanced Arctic-midlatitude connection was observed, while in the warm Arctic-warm Eurasian phase, the linkage between the Arctic and East Asia weakened. However, the mechanism by which sea ice melting affects the strength of the Arctic-Eurasian connection is unclear. (3) At summer mean and sub-seasonal time scales, summer heatwaves in the mid- and low-latitudes of East Asia are dynamically linked to the simultaneous cold anomalies in the mid- and low-troposphere over the Arctic. Arctic summer cold anomalies are conducive to not only slowing down Arctic sea ice melting, but also provide a precursor signal for predicting East Asian winter monsoon. (4) Arctic sea ice loss does not produce substantial impact on summer precipitation variability in the region south to North China. (5) Although there are many studies stressing the important roles of the troposphere-stratosphere interactions in linking Arctic sea ice loss to weather events and climate variability in the midlatitudes, the causal-effect linkage is still weak, and the uncertainty of the impact of the stratosphere process on weather events and climate variability is greater than that of the troposphere process. (6) It is no longer practical to distinguish the different roles of Arctic sea ice forcing and atmospheric internal variability in weather events and climate variability.

In the future, more attention should be paid to the role of Arctic sea ice melting in resulting low-frequency atmospheric circulation variability, as well as the impacts of the spatial distribution differences in Arctic sea ice anomalies and different abnormal amplitudes. Additionally, quantitative research is also needed to explore the roles of Arctic sea ice melting in extreme weather and climate events.

Keywords Arctic sea ice, Extreme weather event, Summer precipitation, Arctic-midlatitude linkage