

北极地区快速升温的驱动机制研究进展

曹云锋^{1*}, 梁顺林²

1. 北京林业大学林学院, 北京 100083;

2. Department of Geographical Sciences, University of Maryland, College Park 20742, USA

* 联系人, E-mail: yfcao@bjfu.edu.cn

2018-05-08 收稿, 2018-07-23 修回, 2018-07-26 接受, 2018-08-21 网络版发表

北京林业大学科技创新计划(BLX201612)、遥感科学国家重点实验室开放基金(OFSLRSS201718)、国家自然科学基金(41701471)和中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2017-4)资助

摘要 受全球持续暖化影响, 北极地区近地表气温正在以超过全球平均两倍以上速度急剧升高, 称为“北极放大”效应。北极的快速升温与地气系统的能量收支异常直接相关, 学术界基于模式模拟、卫星观测等多种手段开展了大量研究工作, 并提出了一系列的理论和证据, 尝试从能量收支的角度对“北极放大”效应的驱动机制进行解释。对驱动“北极放大”的各种潜在机制的理论基础进行了阐释, 并回顾了各种驱动机制的研究进展。综合现有研究表明, 北极的快速升温既与受北极独特的地理、大气环境影响形成的多种辐射反馈机制(如海冰反照率辐射反馈机制、边界层大气逆温引起的温度梯度正反馈机制、普朗克反馈机制等)有关, 也可能是由地球大气、海洋环流异常引起的极向物质与能量传输增强所致。通过对现有研究进行综合分析指出, 受研究方法存在一定缺陷、高质量且时空完整的长时序辐射产品的缺乏, 以及探索不同因素之间关联机制的综合性研究的缺少等影响, 目前对于北极地区快速升温的关键驱动机制仍无定论, 不同理论之间存在很大的分歧。进一步指出, 长时序、高质量的地表与大气辐射产品研发, 研究方法的进一步优化与各种气候因子变化对地气系统能量收支扰动的更准确量化, 以及针对不同气候因子之间内在关联机制的综合分析, 将是未来提升北极地区气候变化研究的重要方向。

关键词 北极放大, 海冰消融, 能量收支, 辐射反馈, 驱动机制

北极地区是对气候变化最为敏感的区域之一, 长期以来受到了气候变化研究的极大关注。尽管最近一段时间, 全球暖化出现了一定程度的减缓甚至停滞的迹象^[1], 但北极地区的气温上升却呈现明显的加速趋势。研究表明, 北极地区的近地表气温正在以超过全球平均两倍以上速度急剧升高, 且在冬季尤为显著, 达到4倍以上, 这一现象被称为“北极放大”(Arctic amplification, AA)^[2~4]。

图1为1979~2016年北半球不同等压面气温变化趋势((a)~(d))与1000 hPa气温变化趋势的空间分布((e)~(f)), 该图清晰展示了近40年北极地区升温趋势

相比于北半球中低纬区域的放大特征: 从平面空间分布上, 北极升温放大现象主要发生在北纬70°以北的北极海盆中心区; 从空间垂直结构上, 北极900 hPa以下的大气边界层区域升温放大现象尤为明显; 从季节分异特征上, 北极升温放大现象主要发生在海冰非融化季的秋冬季节, 其中尤以冬季的升温趋势最大, 夏季北极放大现象表现并不明显。此外, 北地区近地表气温还存在升温幅度不断增大的多年变化趋势特征^[2]。

1 北极地区快速升温的系列影响

北极地区的快速升温不但引起了北极本地的海

引用格式: 曹云锋, 梁顺林. 北极地区快速升温的驱动机制研究进展. 科学通报, 2018, 63: 2757~2771

Cao Y F, Liang S L. Recent advances in driving mechanisms of the Arctic amplification: A review (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2757~2771, doi: 10.1360/N972018-00462

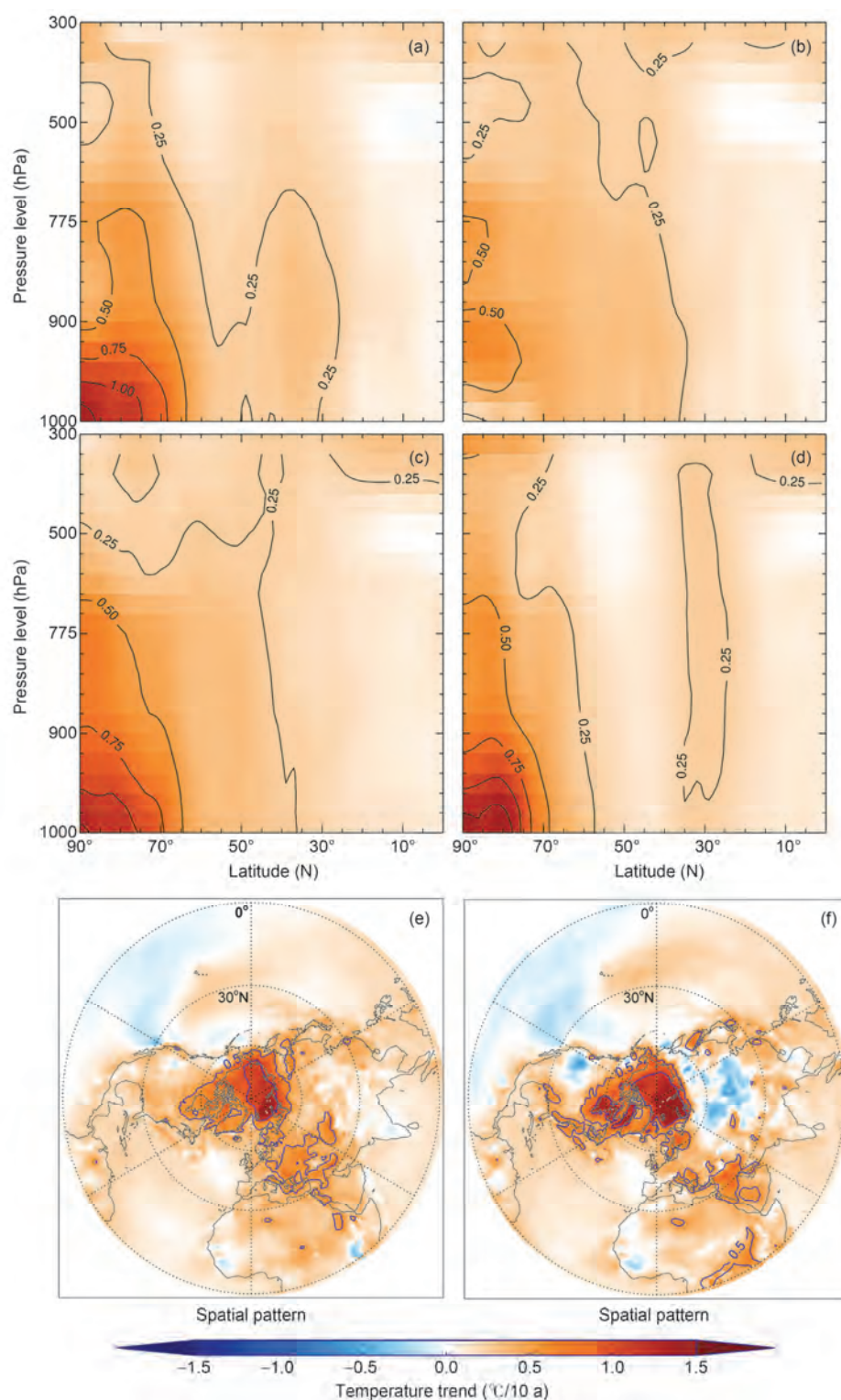


图1 北半球1979~2016年气温变化趋势。(a)~(d)分别为北半球春、夏、秋、冬各季不同纬度、不同等压面上的气温变化趋势;(e)~(f)分别为1000 hPa等压面上北半球年均、冬季气温变化趋势空间分布。本图基于ERA-Interim大气再分析数据1979年3月~2016年2月逐月平均气温生成^[5]

Figure 1 Northern Hemisphere temperature trends from 1979 to 2016. Panel (a)~(d) are zonally averaged temperature trends at different geopotential levels for (a), spring (March–May), (b) summer (June–August), (c) autumn (September–November), (d) winter (December–February). Panel (e) and (f) are spatial patterns of annual and winter temperature trends at 1000 hPa. This figure is generated based on ERA-Interim reanalysis data from March 1979 to February 2016^[5]

冰、冰盖、冻土等的快速消融,同时也对北半球中纬度区域产生了一系列深刻影响。

一方面,在北极本地会产生诸多严重后果:受近地表温度持续升高影响,北极地区海冰覆盖正在加速消融,海冰覆盖范围的极低记录被不断刷新,与20世纪80年代初相比,已经有超过一半的海冰覆盖范围在夏季消失^[6,7],2002~2011年间海冰覆盖面积的减少速度是1979~2006年间减少速度的两倍多^[8],北极海冰覆盖面积近40年间的历史极低记录的前10位全部出现在2006年以后。2017年1月份北极海冰覆盖范围再次创下历史同期极低记录(<http://nsidc.org/arctic-seaicenews>)。人们逐渐意识到在可预见的未来,北极将很有可能出现无冰的夏季^[9]。此外,温度的快速升高导致高纬度地区陆地冻土不断消融,蕴藏在冻土中的甲烷气体被大量释放到大气中^[10];海冰和格陵兰冰盖的不断融化导致北大西洋表层海水密度降低,海水深对流过程减缓而引起北大西洋径向环流逐渐减弱^[11];海冰和冻土的加速消融还会造成北极海洋和陆地生态系统出现扰动,进而导致生态系统生产力、动物栖息地、病原体与病虫害的传播等发生变化^[12]。图2展示了1979~2017年北极9月平均海冰覆盖范围的多年变化过程(a),以及海冰覆盖范围较大的1980年与最低的2012年的9月海冰密集度空间分布特征差异。

另一方面,北极地区的快速升温可能导致北半球中纬度区域极端气候事件增加。研究表明,北极地区的快速升温会导致北半球中-高纬度区域间的温度梯度不断减小,进而引起北半球西风减弱、北极涡旋

出现诸如强度减弱和波幅变大等异常,使得极涡极易侵入中纬度区域而导致极端气候事件(如热浪、极寒、气候干旱等)发生频率增加^[15~17]。过去40年,北半球中纬度大陆区域的气温在不断下降(图1(f)也清晰呈现了这一特征),形成了北极升温与大陆降温的所谓“跷跷板”效应^[18],这一现象也很可能由北极升温放大现象所导致^[2,19,20]。随着北极气温的不断升高,其对中纬度区域的影响有可能会进一步加剧^[21]。相关领域的研究已成为近年来科学界关注的一大热点。

2 北极地区快速升温的主要潜在驱动机制

能量收支失衡是导致北极快速升温的直接原因。为了探究引起北极地区能量收支失衡的驱动机制,学术界基于模式模拟、卫星观测等多种手段开展了大量研究工作,并提出了一系列不同的理论和证据。但受到基础数据源质量差异、研究方法迥异等限制,目前有关北极地区快速升温的关键驱动机制学术界仍无定论,不同的理论之间存在很大的分歧。

北极地区能量的来源主要包括净亏损的本地辐射收支与净盈收的地球大气-海洋系统的极向能量传输两个过程^[22],其中任何一个过程发生异常都有可能引起北极地表的能量收支失衡,进而导致极区的近地表大气温度出现升高或降低的现象。北极升温驱动机制相关研究的主要思路都是尝试通过分析北极本地辐射收支变化或大气/海洋环流异常可能引起的地表能量收支失衡来探究某种因素对北极升温放大的影响。关注北极本地辐射收支变化的研究主要侧重分析由于北极升温所导致的北极地表与大气相

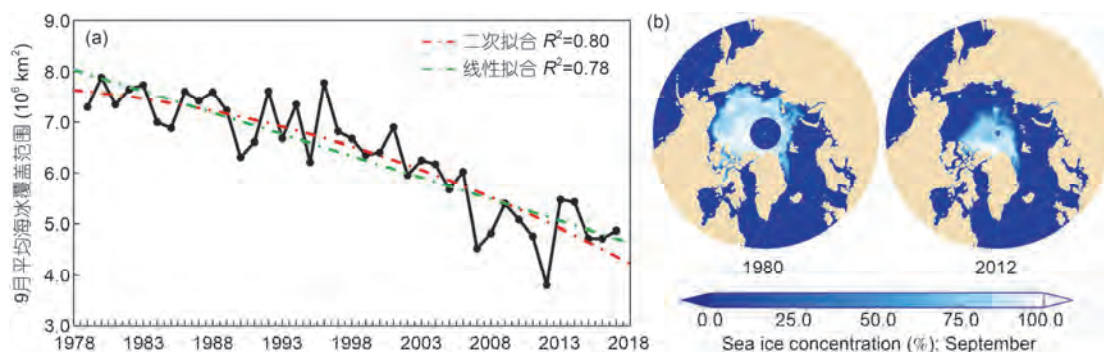


图2 北极地区9月份平均海冰覆盖范围(sea ice extent, SIE)1979~2017年变化过程(a)及1980与2012年(b)9月份海冰密集度(sea ice concentration, SIC)空间分布. 本图基于美国冰雪数据中心的EASE-Grid 2.0 周均冰雪覆盖范围、月均海冰密集度数据生成^[13,14]

Figure 2 Time series of the September sea ice extent (SIE) from 1979 to 2017 (a), and the September sea ice concentration (SIC) in 1980 and 2012 (b) over the Arctic. This figure is generated based on the Equal-Area Scalable Earth Grid (EASE-Grid) 2.0 weekly snow cover and sea ice extent and the daily sea-ice concentration product from the National Snow and Ice Data Center (NSIDC)^[13,14]

关气候因子(如海冰、水汽、云量以及温度梯度等)发生变化后对地气系统辐射收支产生的反馈作用,其中最主要的反馈机制包括海冰反照率辐射反馈、温度梯度反馈和普朗克反馈机制;同时,大气与海洋环流的变化可能导致地气系统的极向的物质与能量传输出现异常,进而引起极区的能量积聚,出现急剧升温现象,其中最主要的两种机制包括北大西洋经向翻转环流(Atlantic meridional overturning circulation, AMOC)的增强驱动北极升温^[23-25]与北半球大气极向传输增强驱动北极边界层大气升温^[26]。图3展示了包括北半球大气/海洋环流的极向物质与能量传输、北极本地由于升温引起的各种辐射反馈在内的驱动北极快速升温的一系列潜在机制。

2.1 北极海冰锐减形成反照率辐射反馈机制

由于海冰及其表面积雪对太阳入射辐射的高反射能力与海水的低反射能力形成巨大的反差,海冰覆盖的异常所引起的海冰表面反照率剧烈波动会产生显著的短波辐射效应——包括反照率辐射强迫变化与反照率辐射反馈作用(图3中红色部分)。辐射强迫是对某种特定气候因子改变地气系统能量收支能力的度量,用以反映该因子在潜在气候变化机制中的重要性,通常以 W m^{-2} 为单位,正强迫使地气系统产生能量增加,进而出现升温,负强迫则由于其能量

亏损具有降温作用^[28]。所谓海冰反照率辐射强迫(sea ice radiative forcing, SIRF),指相比于低反射能力的海水,高反射能力的海冰覆盖存在或者消失给地气系统(在大气顶)能量平衡带来的短波辐射的扰动作用^[29]。观测证据表明,受夏季海冰覆盖面积不断减少^[9,30,31]、海冰融化提前^[32,33]、和海冰持续变薄^[34,35]等因素影响,北极海冰表面反照率在过去30年间出现了大幅度的降低^[6,36],从而导致北极海冰的短波辐射强迫不断减弱。随着北极海冰覆盖的持续减少,海冰反照率辐射强迫不断降低,使得北极地气系统吸收的短波辐射能量增加,从而加速北极海表升温的步伐,这一由于升温导致的海冰面积减少,海冰反照率辐射强迫减小,进而给地气系统带来额外短波辐射能量促使其进一步升温的过程称为海冰反照率的辐射反馈效应(sea ice albedo feedback, SIAF)^[37]。

影响海冰反照率辐射强迫的因素主要包括大气顶太阳入射、海冰反照率与大气状态(主要是云的影响)3个^[29]。其中大气状态因子决定了地表反照率的波动对大气顶短波辐射收支变化的影响,描述大气状态因子最经典的方法为“辐射核”(radiative kernel)方法,现已被广泛应用于地表反照率的辐射效应估算研究中^[29,37-41],该方法利用 $\partial\alpha_p/\partial\alpha_s$ 来表征地表反照率的单位波动(通常为1%)在大气顶产生的行星反照率变化量。相比于其他方法,“辐射核”方法的最

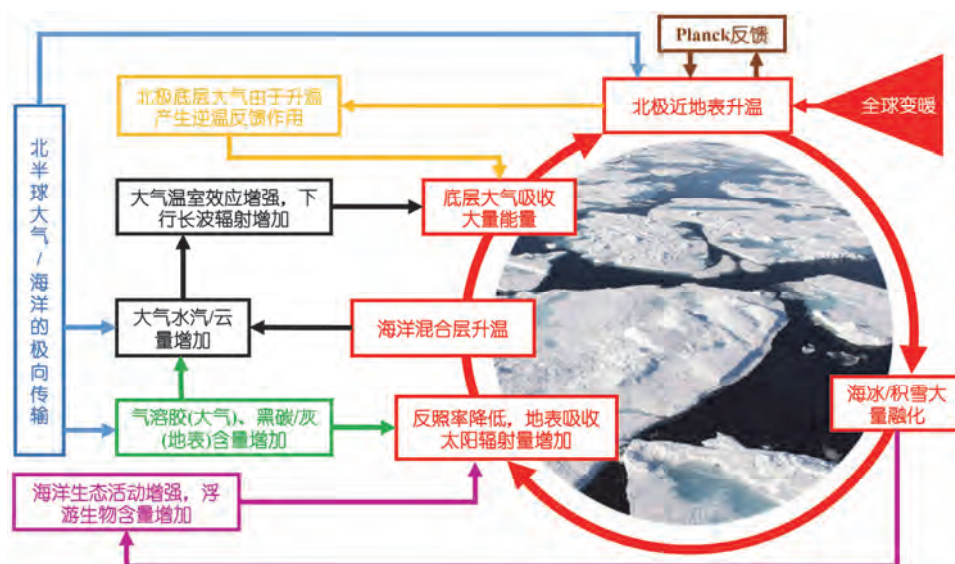


图3 北极地区升温过程的主要驱动机制示意图。本图基于Wendisch等人^[27]改进生成

Figure 3 Schematic of the driving mechanisms of the Arctic amplification. This figure is generated based on an improvement of that from previous study^[27]

大优势在于能够在控制其他气候要素不变的情况下,有效地估算某单一气候要素(如水汽、云量、地表反照率、大气垂直温度结构等)对地气系统长、短波辐射收支的影响,从而实现不同要素辐射强迫的有效分离,横向比较不同气候因素对气候系统辐射收支与潜在气候变化的贡献。目前有关“辐射核”的生成方法主要有3种:(1)基于物理的回归分解法,将行星反照率表达为地表反照率、云量及云光学厚度的函数,以此来分解不同因子的贡献^[42];(2)解析法,将大气顶行星反照率表达为地表与大气贡献的综合影响,并为每个部分建立单独的解析函数^[43];(3)模拟法,基于气候模型进行离线辐射传输模拟,控制其他气候因子保持不变,模拟地表1%的反照率扰动引起的行星反照率变化^[44,45]。研究表明,相比于其他两种方法,模拟法能获得相对更为准确的估算^[46]。

基于“辐射核”方法的海冰反照率辐射强迫与反馈的估算能够通过两个阶段的计算完成:首先利用地表反照率、“辐射核”与太阳入射辐射估算海冰反照率的辐射强迫,然后利用计算所得海冰辐射强迫与地表温度数据进行海冰反照率辐射反馈的计算,其方法分别如式(1)与(2)所示。

$$SIRF(t, R) = \frac{1}{A(R)} \int_R I(t, r) \frac{\partial \alpha_p}{\partial \alpha_s}(t, r) \alpha_c(t, r) dA(r), \quad (1)$$

式中,像素级的SIRF估算包括3个部分,代表了影响辐射强迫的3个独立参量: $I(t, r)$ 为特定位置上特定时间的大气顶太阳短波入射辐射, $\partial \alpha_p / \partial \alpha_s$ 代表了单位地表反照率变化(通常为1%)引起的大气顶反照率的异常, α_c 为反照率差值(海表反照率减掉海水反照率,有些研究中使用了海冰反照率时,需要引入海冰密集度因子),参量 $I(t, r)$ 与 $\partial \alpha_p / \partial \alpha_s$ 共同组成了“辐射核”,表示地表反照率波动引起的大气顶短波辐射异常($\partial F / \partial \alpha$)。

在进行反照率辐射强迫估算的基础上,海冰反照率辐射反馈为单位地表温度升高后导致的海冰反照率辐射强迫的变化量。辐射反馈的估算有回归法与比值法两种,方法的选择往往会给计算结果带来一定的影响。其中回归法指对年均海冰反照率辐射强迫异常与地表温度的距平时间序列进行回归分析,所建立回归关系的斜率项作为海冰反照率对地表温度变化的辐射反馈^[37,38,46];而比值法则是分别计算年均海冰反照率辐射强迫与地表温度的多年变化量,然后计算两者比值得到海冰反照率的辐射反馈^[29,47]。

利用比值法进行海冰反照率辐射反馈作用的估算方法如下所示:

$$SIAF = \frac{\Delta SIRF}{\Delta T_s}, \quad (2)$$

式中, $\Delta SIRF$ 为研究时间段中海冰反照率辐射强迫的多年变化量,而 ΔT_s 为地表温度在该期间的变化量。

针对北极海冰的辐射强迫及其快速融化产生的辐射反馈作用的量化研究工作已经大量开展^[29,47,48]。但是受基础数据与估算方法的限制,各种估算结果间偏差较大:IPCC(intergovernmental panel on climate change)第5次报告给出的基于CMIP5(coupled model inter-comparison project phase 5)模式估算的海冰反照率辐射反馈为 $0.11 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ^[49],与第4次报告给出的 $0.10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ 的估算结果相比几乎没有变化;Flanner等人^[29]基于准观测数据估算出北半球海冰辐射强迫在1979~2008年的30年间减少了 0.22 W m^{-2} ,对应的海冰反照率辐射反馈作用为 $0.28 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$,是模式估算结果的近3倍,从而得出结论认为目前的大气环流模式GCM(general circulation model)对海冰反照率辐射反馈的估算存在严重的低估问题;Dessler^[38]随后通过比较GCM模式与大气再分析数据针对海冰反照率辐射反馈的估算结果,发现GCM模式与大气再分析数据估算结果十分接近,认为没有证据表明GCM模式对海冰反照率辐射反馈的估算存在低估问题;Pistone等人^[47]基于大气顶卫星观测数据估算出北半球海冰辐射强迫在1979~2011年间的减少量为 0.43 W m^{-2} ,比Flanner等人^[29]的估算结果大出近1倍,对应的辐射反馈作用为 $0.31 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ 。比较Flanner等人^[29]与Pistone等人^[47]的估算结果,反映出即便同样基于卫星观测数据,受选用数据源与研究方法不同的影响,估算结果仍存在很大差异。随后,Cao等人^[50]通过研究发现GCM模式与大气再分析数据由于对海冰反照率的多年变化过于保守,特别是对于1996年之后的由海冰加速融化导致的反照率加速下降无法有效跟踪,导致对海冰融化引起的反照率辐射强迫变化和辐射反馈存在比较严重的低估,而Flanner等人^[29]的估算结果由于受经典的“辐射核”方法过多遮盖了海冰反照率变化在云顶的响应的影响,对海冰辐射强迫的多年变化估算也存在低估问题,为了弥合不同研究之间的分歧,他们利用CLARA-A1地表反照率卫星产品和改进的“辐射核”方法对北极海冰从1982~2009年融化产生的反照率辐

射强迫与反馈进行了独立估算,发现1982~2009年间北极海冰消融的北半球和全球辐射强迫分别为 0.33 ± 0.09 与 $0.17 \pm 0.04 \text{ W m}^{-2}$,这一结果相当于同期二氧化碳增加所产生辐射强迫量的21%左右,在此期间,海冰融化对北半球和全球升温产生的辐射反馈作用分别为 0.42 与 $0.31 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$,接近3倍于IPCC第5次报告中基于CMIP5所给的评估值($0.11 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)^[48].表1对上述目前有关北极海冰反照率辐射强迫与反馈机制的主要研究结论进行了综合整理,各主要研究结果之间的差异十分显著.

海冰反照率辐射反馈作用一度被认为是导致“北极放大”的核心因素^[51~54],持该观点的研究者认为全球变暖导致北极夏季海冰大量融化,而海冰的大量融化使得额外的太阳入射短波辐射被低反照率的海水吸收,该部分被吸收的能量通过热交换进入深海并在冬季释放出来加热北极底层大气,导致北极底层大气冬季升温放大.但此观点近年来却面临很大挑战,有模式的控制模拟实验表明,在没有短波反照率反馈作用的情况下,“北极放大”现象依然十分显著^[55],有反面观点认为海冰反照率辐射反馈对于“北极放大”的作用并不十分关键^[56,57],甚至是可以忽略的^[58].且在北极海冰覆盖面积出现历史极低记录的2012年(产生了大量的正反馈短波辐射能量)冬季北极地区却出现了异常低温^[59],海冰覆盖面积迅速恢复,2013年秋季海冰面积同比2012年增加了60%左右^[60],这一现象明显与反照率反馈驱动北极升温放大的理论相悖.

2.2 北极边界层大气逆温引起的温度梯度反馈机制

大气温度梯度反馈(lapse rate feedback)定义为,受全球变暖影响,不同海拔高度上的大气温度梯度发生改变,进而导致大气射出的长波辐射发生变化,大气温室效应增强(或减弱),反作用于地表温度变化的过程^[61](图3中黄色部分).温度梯度指在地球大气

对流层内,温度随着高度增加的变化率,研究表明对流层大气温度梯度会直接影响大气向外的长波辐射冷却作用,从而影响地球大气的温室效应,且温度梯度越大,大气的温室效应越强^[61].逆温是发生在高纬度地区大气边界层非常普遍的大气现象,尤其在冬季,北极地区大气逆温层厚达1200 m,温差通常在10 K以上,发生频率更高达95%以上^[62].通常情况下,大气对流层温度梯度的变化规律表现为,随着海拔高度的增加大气温度呈现逐渐降低的趋势,而在逆温层内,大气温度随着海拔高度的增加却呈现截然相反的增加趋势.

由于逆温现象的存在,高纬度区域表现出与低纬度区域截然不同的大气温度梯度反馈机制,图4阐释了温度梯度在无逆温现象存在的低纬区域与逆温显著的高纬度区域所产生的不同反馈机制的概念模型.在无逆温现象的中低纬区域(图4左图),由于温度梯度现象(对流层内温度随着高度逐渐降低)的存在,底层暖湿气团伴随高强度的大气深对流过程不断上升使得地表与对流层上部气温紧密耦合,气候变暖的背景下上升气团携带大量潜热能至对流层上部并释放,使得对流层上部升温快于地表(这与图1(a)~(d)所示北半球赤道附近大气对流层上部升温趋势显著大于中低部区域的现象一致),此种情况下地表温度无需大幅升高来抵消大气顶的能量收支失衡,温度梯度表现为负反馈作用.而在高纬度地区,由于强逆温现象的存在,边界层大气非常稳定,微弱的大气深对流过程使得近地表大气无法向上混合传递潜热能量,大气长波辐射便成为了地表气温与对流层上部气温的主要耦合机制,而边界层逆温现象的存在又促使底层大气升温后所产生的额外上行长波辐射被滞留在边界层大气中用于加热底层大气,从而形成垂直方向的温度梯度的正反馈作用,加剧了北极地表的升温趋势^[57,63].

Bintanja等人^[55]基于EC-Earth模式的模拟结果发现,由于北极冬季逆温现象的存在,地表的辐射冷却

表1 目前有关北极海冰反照率辐射反馈量化的主要研究结论^{a)}

Table 1 Several representative qualifications of the SIRF and SIAF over the Arctic

	Dessler ^[38]	IPCC (AR4/5) ^[49]	Flanner等人 ^[29]	Pistone等人 ^[47]	Cao等人 ^[48]
SIRF (W m^{-2})	—/—	—/—	0.22(NH)	0.43(NH)	0.33(NH)/0.17(GL)
SIAF ($\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)	~0.1 (GL)	~0.10/0.11 (GL)	0.28(NH)	0.31(GL)	0.42(NH)/0.31(GL)

a) GL, Global; NH, North Hemisphere

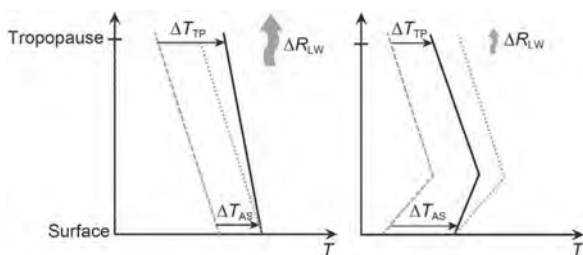


图4 温度梯度反馈机制概念模型^[63]

Figure 4 A conceptual model of the lapse rate feedback mechanism^[63]

作用十分微弱,从而促进了地表的升温放大效应,该研究进一步指出,由于地表的辐射冷却作用与边界层的逆温强度呈现为正相关特征,随着北极地区近地表的不断升温,逆温现象逐渐减弱,温度梯度对北极升温放大的正反馈作用将逐渐减弱。Pithan等人^[56]基于CMIP5多个模式的模拟资料对一系列引起“北极放大”的潜在机制进行了研究,发现逆温产生的温度梯度反馈作用对“北极升温”的绝对贡献与海冰融化产生的反照率辐射反馈作用几乎相当,而对“北极放大”的贡献甚至超过海冰融化引起的反照率的反馈作用跃升至第一位。但Graversen等人^[64]随后基于CCSM4(community climate system model, version 4)模式对温度梯度反馈和地表反照率辐射反馈进行了量化,在确认两者对“北极放大”均表现为正反馈作用的基础上指出海冰反照率的辐射反馈作用仍占主导地位(约40%),逆温引起的温度梯度正反馈机制对“北极放大”作用仅为15%左右。

目前有关温度梯度反馈的研究多基于模式的模拟研究,且忽略温度梯度变化与大气水汽含量、云量的相互作用,但大气下行长波辐射同时受到包括大气垂直温度结构、水汽含量、云量(特别是低云)等诸多因素的影响,大气温度的增加往往也伴随着大气水汽含量与云量的增加,且云量的变化也可能是导致北极底层大气温度梯度变化的重要潜在驱动因素^[65],温度梯度反馈作用在实际的北极地表能量收支变化中的贡献度到底有多大,仍有待深入研究。

2.3 北极地表升温形成的普朗克反馈机制

根据普朗克定律,一定温度的物体会对外辐射能量,形成与波长有关的辐射能量密度谱,对普朗克能量密度谱进行全波长积分后可得到物体在半球空间里的总辐射通量表达式,即斯特潘-玻尔兹曼公式:

$$R = \varepsilon \sigma T^4, \quad (3)$$

常温状态下,上式中 R 为总的射出长波辐射通量, ε 为地表发射率, σ 为斯特潘-玻尔兹曼常数, T 为地表的绝对温度,即物体总的辐射通量与其绝对温度的四次方成正比。为了探讨温度的变化与射出辐射通量的关系,对式(3)进行一阶微分可得:

$$dR = 4\varepsilon\sigma T^3 dT. \quad (4)$$

分析式(4)可以发现,地表射出长波辐射通量的变化不但与温度的变化量有关,且受绝对温度影响显著:同等的外部辐射强迫下,高纬度区域(由于绝对温度低于低纬度区域)需要更大的温度调整以向外辐射能量来达到新的平衡^[66]。举例来说,在温度为30℃左右时,面对 1 W m^{-2} 的外部辐射强迫,地表仅需要0.16℃的升温来平衡这一异常能量收入;而在地表温度为-30℃时,同样 1 W m^{-2} 的外部辐射强迫,地表则需要高达0.31℃的升温才能达到新的能量收支平衡状态^[57]。

普朗克反馈机制(Planck feedback, 图3中棕色部分)指在吸收等量外部辐射强迫的情况下,北极地区(特别在非融化季)由于其相较于赤道地区存在典型的低温特征,需要通过更高的升温幅度对外辐射长波辐射来达到新的能量收支平衡状态^[52,57,63]。Crook等人^[52]基于多个模式对2倍 CO_2 排放强度下的全球不同纬度带上普朗克反馈进行了量化,结果发现虽然普朗克反馈整体表现为负反馈机制,但在半球尺度上呈现显著的高纬减弱特征。目前有关普朗克反馈机制的研究多基于模式的模拟研究,比较一致的结论认为普朗克反馈对“北极升温”的作用为负,但其对“北极放大”效应的作用为正^[52,57]。温度梯度反馈与普朗克反馈往往被统称为温度反馈机制。

2.4 北极地区水汽/云量增加导致大气温室效应增强

北极地区的快速升温现象主要发生在太阳高度角极低的北极非融化季^[2,3],这一时期,大气水汽/云量的温室效应主导的大气下行长波辐射对北极地表能量收支起着关键作用(图3中黑色部分)。大量观测与模拟证据表明,北极地区大气水汽含量近40年来呈显著增加趋势(尤其在北极非融化季的增加趋势更为显著),同时也伴随着云量的显著增加^[67-69],水汽与云量的增加导致大气温室效应增强,大气下行长波增加,进而导致北极地区升温放大。Cao等人^[69]基于遥感观测资料进行系统性研究发现,前置的大气

水汽含量与云量主导的北极地区冬、春季大气下行长波辐射与五月中旬海冰初始融化季的海冰密集度高度负相关, 增强的北极冬、春季大气温室效应不但导致了地表的升温放大过程, 而且由于其对冬季海冰冻结过程的阻滞和春季海冰初融过程的加速, 最终导致北极海冰融化季节提前, 进而触发了海冰融化季节的反照率辐射正反馈过程. 北极冬、春季大气水汽与云量产生的下行长波辐射不但控制着地表温度和海冰覆盖的长期趋势, 同时也主导着两者的年际变化过程^[69,70]. 一个典型案例: 北极海冰覆盖面积2012年达到了历史极低记录, 而在随后的2013年却出现了快速恢复, 甚至有研究开始讨论北极海冰变化趋向增加的可能性^[71], 相关研究表明, 正是由于2013年冬、春季北极地区大气水汽与云量显著低于常年, 引起大气下行长波辐射显著减少, 大气保温作用(温室效应)减弱, 导致气温异常偏低^[59,69], 进而促使海冰面积与体积在这一年都出现了较大幅度的恢复.

北极地区的大气水汽变化主要受两个来源控制(图3): 一方面是本地海水的蒸发作用, 北极地表升温可能导致海水蒸发作用的加强, 使得大气水汽与云量增加, 从而形成水汽/云对北极升温过程的正反馈作用^[58,72]; 另一方面是大气的极向传输过程, 北半球大气环流主导的极向物质与能量传输过程也是高纬度区域大气水汽与云量变化的重要驱动, 大气的极向传输增强会将多于常年水平的暖湿气流带入北极地区, 增强大气温室效应, 加热底层大气, 导致北极近地表升温放大^[26]. 由于北极地区大气水汽含量的增加与地表升温主要发生在非融化季节, 整个北极海盆大部分区域被厚厚的海冰所覆盖, 地表蒸发作用十分微弱, 因此目前主流的观点更倾向于北极地区大气水汽含量的增加主要由北半球大气极向传输过程的增强所致, 因而外部强迫下的北半球大气极向活动增强会携带大量的暖湿气流进入高纬度区域, 使得北极地区大气水汽集聚、云量增加, 进而促使大气下行长波增加、温室作用增强^[26,70,73-77]. 甚至有最新的研究认为北极夏季海冰的变化也主要受控于大气环流的变化引起的大气下行长波的增加, 而非海冰反照率的辐射反馈机制^[78].

大气云覆盖虽然对短波有很强的反射作用, 但在北极地区除夏季外均呈现整体的对地表的加热作用, 特别在太阳入射辐射很小(在极夜期间几乎为0)的北极非融化季, 云覆盖对地表表现为十分显著的正强迫

作用^[79]. 因此, 北极云量的增加对地表升温的贡献同样十分关键. 云量的变化主要受大气水汽含量的影响, 往往表现为与大气水汽含量同步变化的特征^[59,69,74]. 但也有研究指出, 北极地区低云的变化主要受本地海水蒸发作用引起的水汽变化控制, 与大气水汽和云量的反馈机制有关, 而北极地区中高层云量的变化则主要与大气的极向水汽传输过程有关^[80,81]. 同时, 北极地区大气气溶胶含量的变化对云的生命周期、光学厚度及其云量变化的影响也同样值得关注^[82,83].

2.5 洋流极向热量传输增强导致北极地表升温

观察北极地理分布特征, 可以发现北冰洋周边大部分区域被美洲大陆与欧亚大陆环抱, 与中纬度区域海洋的连通借由两个主要通道(图5): 一侧通过浅浅的白令海峡与太平洋相通, 另一侧通过开阔的格陵兰海和巴伦支海与北大西洋相通. 其中由于北太平洋与北冰洋借由白令海峡进行的能量交换非常有限, 其对北极的影响被认为几乎可以忽略, 因此, 北大西洋经向翻转环流所携带的能量便成为了海洋

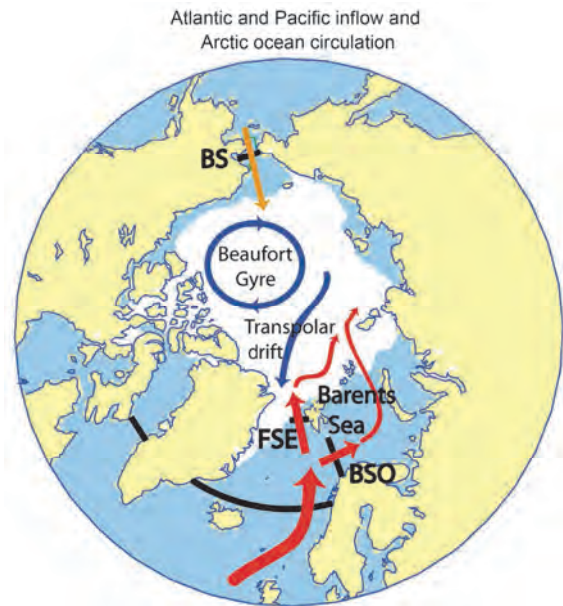


图5 (网络版彩色)北冰洋与北太平洋、北大西洋的主要洋流交互机制示意图. 其中BSO (Barents Sea opening)表示北大西洋暖流的巴伦支海分支, FSE (eastern Fram strait)表示北大西洋暖流的弗拉姆海峡分支, BS (Bering strait)指白令海峡^[25]

Figure 5 (Color online) Schematic of current inflow from the north Atlantic/Pacific Ocean to the Arctic Ocean. BSO (Barents Sea opening) and FSE (eastern Fram strait) are the Barents Sea branch and the Eastern Fram branch of the Atlantic current. BS is the Bering strait^[25]

极向能量传输的唯一主导机制^[25]。支持洋流驱动理论的学者认为北大西洋经向翻转环流的异常所引起的海洋极向能量传输变化会很大程度上影响下一年北极海冰的变化,而近几十年北极海冰的持续加速融化正是由于增强的AMOC携带大量额外热量进入北冰洋,加热了海冰表面与北极底层大气,从而导致北极升温放大与海冰加速融化^[23~25](图3中蓝色部分)。

目前支撑有关洋流异常驱动北极升温理论的证据主要基于大气环流模式的模拟研究。但最新的观测证据表明,北大西洋经向环流在过去的几十年间呈现显著减弱趋势^[84~87],与北极的急速升温现象严重背离。

地气系统的极向能量传输包括大洋环流与大气环流两部分,两者之间存在很强的互补机制:海洋的极向能量传输增强会导致北极升温,然后通过海-汽能量交换导致大气的极向能量传输减弱(图6)^[25,88];而大气的极向能量传输增强同样会导致北极升温,进而通过海-汽能量交换、海冰与冰盖融化等影响高纬度海水垂直对流过程导致经向翻转环流的强度减弱,进而导致海洋极向能量传输减弱^[89]。目前两者对比海洋与大气极向能量传输的绝对量级,大气在北半球的高纬度区域的极向能量传输占据了绝对主导地位^[90,91],结合前文所述北极大气水汽含量在过去几十年间显著增加、大西洋经向翻转环流持续减弱的诸多观测和模拟证据,越来越多的研究倾向于认为北大西洋经向翻转环流的减弱更可能是北极升温-冰盖、海冰融化所产生的后果,而并非其驱动原因^[84,85,89]。

2.6 其他影响北极地区能量收支异常的潜在因素

化石燃料的使用与生物质燃烧所产生的大气气溶胶等向北极地区传输量的变化(图3蓝色与绿色)不但会对北极地区的太阳入射短波辐射产生直接影响,

而且还会通过改变北极大气云的寿命、光学厚度和云量大小间接影响北极地区的能量收支过程,从而进一步影响北极地区的地表温度变化^[82,83,92,93]。

此外,北极地区的不断升温引起的海冰快速融化还会导致诸如海洋生产力、种群混合、病原体传播等一系列海洋生态活动出现异常^[12],环北冰洋陆地区域植被返青期提前、生长季延长以及植被绿度提高等系列变化^[94],这些海洋与陆地生态活动的变化会引起诸如地表反照率、地表潜热蒸散等的变化,进而对北极地区的升温过程形成一定的反馈作用(图3紫色)。

综合前文所介绍有关北极快速升温驱动机制研究的各种理论与研究证据,北极地区近几十年来的快速升温过程既与北极本地的地理、大气环境特征有关,又与地气系统的整体变化过程有关,任何单一机制在北极升温过程中的贡献并非孤立的存在,而是彼此交织,相互影响与激励。如北极冬春季大气温室效应的增强会引起春季海冰的提前融化,诱发海冰反照率的正反馈过程;北极地区云量的变化也可能引起底层大气温度梯度的变化;海冰大量融化一方面会引起海洋上层水密度降低,进而可能导致海水的垂直对流过程与经向翻转环流的强度减弱,另一方面可能导致海-汽间物质与能量交换增强;大气与海洋环流的极向能量传输也被认为存在很强的互补机制。因此,北极地区的快速升温是全球变化背景下的多种机制共同作用的系统性结果。

3 讨论

现有的大量研究证据表明,各种机制都有坚实的理论基础与强有力的证据支撑,但一个无法回避的事实是,不同的研究之间仍无法形成共识,甚至存在严重的观点对立。分析导致现有研究之间存在巨大分歧的原因,归纳起来主要包括几个方面:

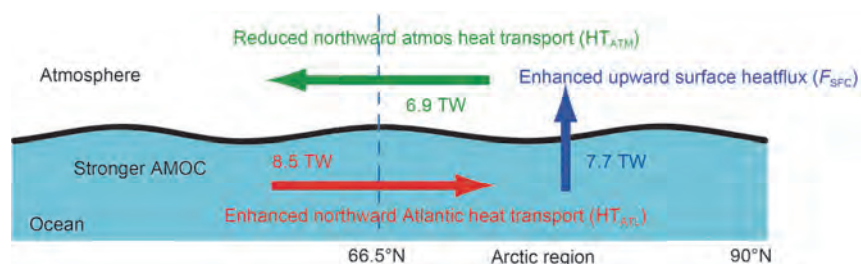


图6 (网络版彩色)北大西洋经向翻转环流与大气环流的极向能量传输互补机制示意图^[25]

Figure 6 (Color online) Schematic of the complementary mechanism of the northward heat transportation between the Atlantic meridional overturning circulation (AMOC) and the north hemisphere atmospheric general circulation^[25]

(1) 研究方法仍存在较大缺陷,有待进一步改进.目前针对各种气候因子的辐射反馈机制的量化研究多基于大气环流模式的模拟进行,该类方法最初通过模式控制实验来实现对特定气候因子变化引起的北极地气系统辐射收支扰动的量化,实现不同气候因子反馈机制的有效分离^[61].但由于很多模式的气候参量参数化方案在北极地区存在很大问题,导致大部分模式的输出参量^[95-97]以及以此为基础生成的反馈机制量化结果^[29,48]都存在比较严重偏差.近年来,在前期大气环流模式控制模拟实验基础上进一步发展形成一种“辐射核”方法^[44,45],该方法不但能够实现不同气候因子反馈机制的分离,且可以引入观测数据参与计算,从而有效提升了辐射反馈的量化精度^[29,37,98].但相关研究表明,“辐射核”方法依然存在对气候因子变化引起的地气系统辐射扰动量化失真的问题^[48,99].因此,改进现有气候因子辐射反馈量化方法,特别是提升大气环流模式对于不同气候变化情景的模拟能力,将有助于提升北极地区不同气候因子辐射反馈机制的量化精度,从而实现不同研究结论的逐步弥合.

(2) 缺乏高质量、时空完整且长时间覆盖的辐射产品.受地理条件所限,北极地区可获取的有效地面观测数据十分稀少^[100],观测数据的稀缺也使得各种大气再分析项目在此区域没有足够的可用同化输入资料,相关的研究表明,多数长时间序列的大气再分析数据的验证质量在空间上均不稳定,且彼此间存在很大的偏差^[100-102];而部分时序覆盖较长的遥感产品(如GEWEX SRB, ISCCP等),因其数据生产环节所使用的输入资料(如云量、水汽等)本身在北极地区存在比较严重的质量问题,导致辐射产品同样存在比较严重的数据偏差^[102,103].科学数据的不一致性也是导致现有针对北极地表能量收支与气候变化的不同研究之间存在巨大分歧的重要原因之一.

基于现有国际多源遥感观测资料,借助于定量遥感反演、多源数据融合、数据同化等技术,可有望改进北极地区地表与大气顶辐射产品质量,延长高质量辐射数据的时间覆盖范围.目前,国内外多个研究机构——如美国航空航天局地球观测系统的云与地球辐射能量(clouds and the earth's radiant energy system, CERES)产品;欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)的气候监测卫星应用基础设施(satellite application facility on climate monitoring, CM SAF)生产的云、反

照率与辐射系列产品;北京师范大学联合国内相关研究机构正在研发的“全球气候数据集”系列地表与大气辐射产品,都在尝试努力构建具有足够时间长度、一致性和连续性的地表与大气辐射卫星气候数据集,以用于开展地气系统的能量收支与气候变化研究^[104].利用长时序、高质量的地表与大气辐射资料,可以实现对北极地区各种气候因子的辐射反馈机制的精确量化,有助于对北极地区地表与大气顶能量收支变化的准确理解与把握.

(3) 缺少系统性的研究,在量化对比不同因素对北极地表能量收支影响能力的基础上,对各因素间内在关系进行综合分析.无论主要受本地因素影响的反照率反馈和温度梯度反馈,还是受北半球大气/海洋环流影响的极向能量与物质传输,最终都是通过改变北极地区的能量收支过程而影响该区域气候变化.不同的驱动因素往往存在时间的异步特征,如海冰反照率辐射反馈机制主要发生在北半球的春末与夏季^[29,48],而北极的逆温现象^[62]、水汽/云量增加引起的温室效应增强^[69,70,105]则主要发生在冬春季节.因此,系统性量化各种因素对北极地区能量收支的影响,并利用各因素发生时间的异步特征分析不同因素之间的潜在相互影响,对于揭示北极地表能量收支失衡的影响机制具有重要意义.

此外,将地球的3个寒极——北极、南极、青藏高原关联起来,把北极地区气候的变化放在更大的时空尺度上进行研究,分析三者间气候变化的耦合机制,也将有助于深化我们对特定区域乃至全球气候变化特征与机制的认识.

4 结论与展望

受全球持续暖化影响,北极地区气候近年来发生剧烈变化,近地表气温正在以超过全球平均2倍以上的速度急剧升高,冬季的升温幅度甚至达到全球平均的4倍以上,称为“北极放大”效应.

为了探究“北极放大”现象的驱动机制,学术界基于模式模拟、卫星观测等多种手段开展了大量研究工作,并提出了一系列驱动北极升温放大机制的不同理论.综合目前各种研究理论与证据,北极地区近几十年来的快速升温过程是全球变化背景下的多种机制共同作用的系统性结果,既与北极本地独特地理、大气环境造成的各种辐射反馈机制有关,又与气候变化背景下的地气系统整体变化过程有关.虽然

目前针对北极气候变化的研究工作取得了一系列优秀成果,拓展了人们对于北极快速升温的驱动机制的认识,但不同的研究之间的分歧依然很大,甚至存在严重的观点对立。

海冰反照率的辐射反馈作用曾被认为是导致北极快速升温的关键驱动^[52-55],且国内外开展了大量卓有成效的量化研究工作^[29,47,48],但大量的控制模拟实验表明海冰反照率的辐射反馈作用对于“北极放大”似乎并不十分关键^[56-58]。也有研究认为北极冬、春边界层大气存在的强逆温现象引起的大气垂直方向的温度梯度正反馈作用是导致“北极放大”的核心驱动机制^[57,63],但这一结论也受到了很大的挑战^[64],此方面的研究多基于模式模拟,且北极大气温度梯度变化受云量变化的影响很大^[65],相关结论并没有受到广泛的认可。近年来,大量研究认为北极大气水汽与云量增加引起的大气温室效应增强极有可能是北极非融化季地表快速升温和海冰初始融化提前的关键驱动^[67-69],但增加的大气水汽是来源于本地升温导致的海表蒸发作用加强^[58,72],还是来源于北半球大气极向传输过程增强带来的大量暖湿气流^[26,70,73-77],目前仍没有形成有效共识。北大西洋经

向翻转环流增强可以携带大量额外热量进入北冰洋,进而加热北极海水与底层大气,导致北极升温放大与海冰加速融化,因此洋流的作用也曾被认为是引起北极升温放大的关键作用^[23-25],但大量观测证据表明,北大西洋经向环流近几十年来呈显著减弱趋势^[84-87],因而北大西洋经向翻转环流的减弱更可能是北极快速升温所产生的后果,而并非其驱动原因^[84,85,89]。此外,大气气溶胶与北极海洋、陆地生态系统的变化也会不同程度影响北极地区的地表能量收支过程,进而对北极温度变化产生一定程度的影响^[12,82,83,92-94],相关影响的准确量级是多少,仍有待进一步的量化研究。

现有研究之间存在如此巨大的分歧,研究方法存在的不足、高质量且时空完整的长时序辐射产品的缺乏、以及缺少系统性分析不同因素之间内在关系的综合研究是主要原因。因此,未来在长时序、高质量的地表与大气辐射产品的支撑下,优化研究方法对各种气候因子变化引起的北极地区能量收支异常进行系统量化与对比,并综合分析不同气候因子之间的潜在相互影响,将有助于揭示导致北极地区能量收支失衡与升温放大现象的系统机制。

参考文献

- 1 Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 2013, 501: 403-407
- 2 Cohen J, Screen J A, Furtado J C, et al. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nat Geosci*, 2014, 7: 627-637
- 3 Screen J A, Francis J A. Contribution of sea-ice loss to Arctic amplification is regulated by Pacific Ocean decadal variability. *Nat Clim Change*, 2016, 6: 856-860
- 4 Zhao J P, Shi J X, Wang Z M, et al. Arctic amplification produced by sea ice retreat and its global climate effects (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2015, 30: 985-995 [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. *地球科学进展*, 2015, 30: 985-995]
- 5 Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q J Roy Meteorol Soc*, 2011, 137: 553-597
- 6 Comiso J C, Hall D K. Climate trends in the Arctic as observed from space. *WIREs Clim Change*, 2014, 5: 389-409
- 7 Stroeve J, Holland M M, Meier W, et al. Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L09501
- 8 Ke C Q, Peng H T, Sun B, et al. Spatio-temporal variability of Arctic sea ice from 2002 to 2011 (in Chinese). *J Remote Sens*, 17: 452-466 [柯长青, 彭海涛, 孙波, 等. 2002年~2011年北极海冰时空变化分析. *遥感学报*, 2013, 17: 452-466]
- 9 Kerr R A. Arctic summer sea ice could vanish soon but not suddenly. *Science*, 2009, 323: 1655
- 10 Christensen T R. Understand Arctic methane variability. *Nature*, 2014, 509: 279-281
- 11 Moore G W K, Våge K, Pickart R S, et al. Decreasing intensity of open-ocean convection in the Greenland and Iceland seas. *Nat Clim Change*, 2015, 5: 877-882
- 12 Post E, Bhatt U S, Bitz C M, et al. Ecological consequences of sea-ice decline. *Science*, 2013, 341: 519-524
- 13 Brodzik M J, Billingsley B, Haran T, et al. EASE-Grid 2.0: Incremental but significant improvements for Earth-gridded data sets. *ISPRS Int J Geo-Inform*, 2012, 1: 32-45
- 14 Cavaieri D, Parkinson C, Gloersen P, et al. Sea ice concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS passive microwave data. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center, 1996

- 15 Gramling C. The Siberian snow connection. *Science*, 2015, 347: 821
- 16 Shepherd T G. Effects of a warming Arctic. *Science*, 2016, 353: 989–990
- 17 He S, Wang H. Linkage between the East Asian January temperature extremes and the preceding Arctic Oscillation. *Int J Climatol*, 2015, 36: 1026–1032
- 18 Overland J E, Wood K R, Wang M. Warm Arctic—cold continents: Climate impacts of the newly open Arctic Sea. *Polar Res*, 2011, 30: 15787
- 19 Cohen J. An observational analysis: Tropical relative to Arctic influence on midlatitude wather in the era of Arctic amplification. *Geophys Res Lett*, 2016, 43: 5287–5294
- 20 Cohen J, Pfeiffer K, Francis J A. Warm Arctic episodes linked with increased frequency of extreme winter weather in the United States. *Nat Commun*, 2018, 9: 869
- 21 Francis A J, Vavrus S, Cohen J. Amplified Arctic warming and mid-latitude weather: New perspectives on emerging connections. *WIREs Clim Change*, 2017, e474
- 22 Trenberth K E, Fasullo J T. Changes in the flow of energy through the Earth's climate system. *Meteorol Zeitschrift*, 2009, 18: 369–377
- 23 Smedsrud L H, Esau I, Ingvaldsen R B, et al. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Rev Geophys*, 2013, 51: 415–449
- 24 Spielhagen R F, Werner K, Sorensen S A, et al. Enhanced modern heat transfer to the Arctic by warm Atlantic water. *Science*, 2011, 331: 450–453
- 25 Zhang R. Mechanisms for low-frequency variability of summer Arctic sea ice extent. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 4570–4575
- 26 Binder H, Boettcher M, Grams C M, et al. Exceptional air mass transport and dynamical drivers of an extreme wintertime Arctic warm event. *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 12028–12036
- 27 Wendisch M, Brückner M, Burrows P J, et al. Understanding causes and effects of rapid warming in the Arctic. *Eos*, 2017, 98
- 28 Bernstein L, Bosch P, Canziani O, et al. Climate change 2007: Synthesis report: An assessment of the intergovernmental panel on climate change. IPCC, 2008
- 29 Flanner M G, Shell K M, Barlage M, et al. Radiative forcing and albedo feedback from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008. *Nat Geosci*, 2011, 4: 151–155
- 30 Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L01703
- 31 Parkinson C L, Cavalieri D J. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *Cryosphere*, 2012, 6: 871–880
- 32 Markus T, Stroeve J C, Miller J. Recent changes in Arctic sea ice melt onset, freezeup, and melt season length. *J Geophys Res*, 2009, 114: C12024
- 33 Stroeve J C, Markus T, Boisvert L, et al. Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 1216–1225
- 34 Kwok R, Rothrock D A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L15501
- 35 Maslanik J, Fowler C, Stroeve J, et al. A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L24501
- 36 Riihelä A, Manninen T, Laine V. Observed changes in the albedo of the Arctic sea-ice zone for the period 1982–2009. *Nat Clim Change*, 2013, 3: 895–898
- 37 Colman R A. Surface albedo feedbacks from climate variability and change. *J Geophys Res-Atmos*, 2013, 118: 2827–2834
- 38 Dessler A. Observations of climate feedbacks over 2000–2010 and comparisons to climate models. *J Clim*, 2013, 26: 333–342
- 39 Dessler A E. A determination of the cloud feedback from climate variations over the past decade. *Science*, 2010, 330: 1523–1527
- 40 Gordon N D, Jonko A K, Forster P M, et al. An observationally based constraint on the water-vapor feedback. *J Geophys Res-Atmos*, 2013, 118: 12435–412443
- 41 Zelinka M D, Hartmann D L. Climate feedbacks and their implications for poleward energy flux changes in a warming climate. *J Clim*, 2012, 25: 608–624
- 42 Qu X, Hall A. Assessing snow albedo feedback in simulated climate change. *J Clim*, 2006, 19: 2617–2630
- 43 Donohoe A, Battisti D S. Atmospheric and surface contributions to planetary albedo. *J Clim*, 2011, 24: 4402–4418
- 44 Shell K M, Kiehl J T, Shields C A. Using the radiative kernel technique to calculate climate feedbacks in NCAR's Community Atmospheric Model. *J Clim*, 2008, 21: 2269–2282
- 45 Soden B J, Held I M, Colman R, et al. Quantifying climate feedbacks using radiative kernels. *J Clim*, 2008, 21: 3504–3520
- 46 Qu X, Hall A. On the persistent spread in snow-albedo feedback. *Clim Dynam*, 2013, 42: 69–81
- 47 Pistone K, Eisenman I, Ramanathan V. Observational determination of albedo decrease caused by vanishing Arctic sea ice. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 11: 3322–3326

- 48 Cao Y F, Liang S L, Chen X N, et al. Assessment of sea-ice albedo radiative forcing and feedback over the Northern Hemisphere from 1982 to 2009 using satellite and reanalysis data. *J Clim*, 2015, 28: 1248–1259
- 49 Flato G, Marotzke J, Abiodun B, et al. Evaluation of climate models. *Climate Change 2013: The physical science basis*. In: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- 50 Cao Y F, Liang S L, He T, et al. Evaluation of four reanalysis surface albedo data sets in Arctic using a satellite product. *IEEE Geosci Remote Sens*, 2016, 13: 384–389
- 51 Crook J A, Forster P M, Stuber N. Spatial patterns of modeled climate feedback and contributions to temperature response and polar amplification. *J Clim*, 2011, 24: 3575–3592
- 52 Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 2010, 464: 1334–1337
- 53 Serreze M, Barrett A P, Stroeve J C, et al. The emergence of surface-based Arctic amplification. *Cryosphere*, 2009, 3: 11–19
- 54 Taylor P C, Cai M, Hu A, et al. A decomposition of feedback contributions to polar warming amplification. *J Clim*, 2013, 26: 7023–7043
- 55 Bintanja R, Graverson R G, Hazeleger W. Arctic winter warming amplified by the thermal inversion and consequent low infrared cooling to space. *Nat Geosci*, 2011, 4: 758–761
- 56 Pithan F, Mauritsen T. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nat Geosci*, 2014, 7: 181–184
- 57 Graverson R G, Wang M. Polar amplification in a coupled climate model with locked albedo. *Clim Dynam*, 2009, 33: 629–643
- 58 Winton M. Amplified Arctic climate change: What does surface albedo feedback have to do with it? *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L03701
- 59 Liu Y, Key J R. Less winter cloud aids summer 2013 Arctic sea ice return from 2012 minimum. *Environ Res Lett*, 2014, 9: 044002
- 60 Cui H Y, Qiao F L, Shu Q. Reasons for the increase minimum Arctic sea ice extent in 2013 compared with 2012 (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2015, 37: 23–32 [崔红艳, 乔方利, 舒启. 2013 年北极最小海冰范围比 2012 年增加的原因分析. *海洋学报*, 2015, 37: 23–32]
- 61 Bony S, Colman R, Kattsov V M, et al. How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *J Clim*, 2006, 19: 3445–3482
- 62 Serreze M, Kahl D J, Schnell C R. Low-level temperature inversions of the Eurasian Arctic and comparisons with Soviet drifting station data. *J Clim*, 1992, 5: 615–629
- 63 Pithan F, Mauritsen T. Comments on “Current GCMs’ Unrealistic Negative Feedback in the Arctic”. *J Clim*, 2013, 26: 7783–7788
- 64 Graverson R G, Langen P L, Mauritsen T. Polar amplification in the CCSM4: Contributions from the lapse-rate and the surface-albedo feedbacks. *J Clim*, 2014, 27: 4433–4450
- 65 Cronin W T, Tziperman E. Low clouds suppress Arctic air formation and amplify high-latitude continental winter warming. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 11490–11495
- 66 Joshi M, Shine K, Ponater M, et al. A comparison of climate response to different radiative forcings in three general circulation models: Towards an improved metric of climate change. *Clim Dynam*, 2003, 20: 843–854
- 67 Boisvert L N, Stroeve J C. The Arctic is becoming warmer and wetter as revealed by the Atmospheric Infrared Sounder. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 4439–4446
- 68 Burt M A, Randall D A, Branson M D. Dark warming. *J Clim*, 2015, 29: 705–719
- 69 Cao Y F, Liang S L, Chen X N, et al. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting. *Sci Rep*, 2017, 7: 8462
- 70 Kapsch M L, Graverson R G, Tjernström M. Springtime atmospheric energy transport and the control of Arctic summer sea-ice extent. *Nat Clim Change*, 2013, 3: 744–748
- 71 Tilling R L, Ridout A, Shepherd A, et al. Increased Arctic sea ice volume after anomalously low melting in 2013. *Nat Geosci*, 2015, 8: 643–646
- 72 Ghatak D, Miller J. Implications for Arctic amplification of changes in the strength of the water vapor feedback. *J Geophys Res-Atmos*, 2013, 118: 7569–7578
- 73 Cullather R I, Lim Y K, Boisvert L N, et al. Analysis of the warmest Arctic winter, 2015–2016. *Geophys Res Lett*, 2016, 43: 10808–10816
- 74 Dong X, Zib B J, Xi B, et al. Critical mechanisms for the formation of extreme Arctic sea-ice extent in the summers of 2007 and 1996. *Clim Dynam*, 2014, 43: 53–70
- 75 Gimeno L, Vázquez M, Nieto R, et al. Atmospheric moisture transport: The bridge between ocean evaporation and Arctic ice melting. *Earth Sys Dynam*, 2015, 6: 1033–1045

- 76 Graverson R G, Burtu M. Arctic amplification enhanced by latent energy transport of atmospheric planetary waves. *Q J Roy Meteorol Soc*, 2016, 142: 2046–2054
- 77 Woods C, Caballero R. The role of moist intrusions in winter Arctic warming and sea ice decline. *J Clim*, 2016, 29: 4473–4485
- 78 Ding Q, Schweiger A, L’Heureux M, et al. Influence of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice. *Nat Clim Change*, 2017, 7: 289–295
- 79 Intrieri J M, Fairall C W, Shupe M D, et al. An annual cycle of Arctic surface cloud forcing at Sheba. *J Geophys Res*, 2002, 107: 8039
- 80 Vavrus S J, Bhatt U S, Alexeev V A. Factors influencing simulated changes in future Arctic cloudiness. *J Clim*, 2011, 24: 4817–4830
- 81 Wu D L, Lee J N. Arctic low cloud changes as observed by MISR and CALIOP: Implication for the enhanced autumnal warming and sea ice loss. *J Geophys Res Atmos*, 2012, 117: D07107
- 82 Flanner M G. Arctic climate sensitivity to local black carbon. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118: 1840–1851
- 83 Garrett T J, Zhao C. Increased Arctic cloud longwave emissivity associated with pollution from mid-latitudes. *Nature*, 2006, 440: 787–789
- 84 Schiermeier Q. Atlantic current strength declines. *Nature*, 2014, 509: 270–271
- 85 Bryden H L, Longworth H R, Cunningham S A. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N. *Nature*, 2005, 438: 655–657
- 86 Smeed D A, McCarthy G D, Cunningham S A, et al. Observed decline of the Atlantic meridional overturning circulation 2004–2012. *Ocean Sci*, 2014, 10: 29–38
- 87 Jackson L C, Peterson K A, Roberts C D, et al. Recent slowing of Atlantic overturning circulation as a recovery from earlier strengthening. *Nat Geosci*, 2016, 9: 518–522
- 88 Koenigk T, Brodeau L. Ocean heat transport into the Arctic in the twentieth and twenty-first century in EC-earth. *Clim Dynam*, 2013, 42: 3101–3120
- 89 Rahmstorf S, Box J E, Feulner G, et al. Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. *Nat Clim Change*, 2015, 5: 475–480
- 90 Fasullo J T, Trenberth K E. The annual cycle of the energy budget. Part ii: Meridional structures and poleward transports. *J Clim*, 2008, 21: 2313–2325
- 91 Trenberth K E, Fasullo J T. Atlantic meridional heat transports computed from balancing Earth’s energy locally. *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 1919–1927
- 92 Acosta Navarro J C, Varma V, Riipinen I, et al. Amplification of Arctic warming by past air pollution reductions in Europe. *Nat Geosci*, 2016, 9: 277–281
- 93 Hansen J, Nazarenko L. Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, 101: 423–428
- 94 Gonsamo A, Chen J M. Circumpolar vegetation dynamics product for global change study. *Remote Sens Environ*, 2016, 182: 13–26
- 95 Koenigk T, Devasthale A, Karlsson K G. Summer Arctic sea ice albedo in CMIP5 models. *Atmos Chem Phys*, 2014, 14: 1987–1998
- 96 Sorteberg A, Kattsov V, Walsh J E, et al. The Arctic surface energy budget as simulated with the IPCC AR4 AOGCMs. *Clim Dynam*, 2007, 29: 131–156
- 97 Shu Q, Song Z, Qiao F. Assessment of sea ice simulations in the CMIP5 models. *Cryosphere*, 2014, 9: 399–409
- 98 Chung E S, Yeomans D, Soden B J. An assessment of climate feedback processes using satellite observations of clear-sky OLR. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L02702
- 99 Singh D, Flanner M G, Perket J. The global land shortwave cryosphere radiative effect during the MODIS era. *Cryosphere*, 2015, 9: 2057–2070
- 100 Lindsay R, Wensnahan M, Schweiger A, et al. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic. *J Clim*, 2014, 27: 2588–2606
- 101 Chaudhuri A H, Ponte R M, Nguyen A T. A comparison of atmospheric reanalysis products for the Arctic Ocean and implications for uncertainties in air-sea fluxes. *J Clim*, 2014, 27: 5411–5421
- 102 Wang K, Dickinson R E. Global atmospheric downward longwave radiation at the surface from ground-based observations, satellite retrievals, and reanalyses. *Rev Geophys*, 2013, 51: 150–185
- 103 Zhang T, Stackhouse P W, Gupta S K, et al. The validation of the GEWEX SRB surface longwave flux data products using BSRN measurements. *J Quant Spectrosc RA*, 2015, 150: 134–147
- 104 Liang S L, Tang S H, Zhang J, et al. Production of the global climate data records and application to climate studies (in Chinese). *J Remote Sens*, 2016, 6: 1491–1499 [梁顺林, 唐世浩, 张杰, 等. 全球气候数据集生成及气候变化应用研究. *遥感学报*, 2016, 6: 1491–1499]
- 105 Park H S, Lee S, Son S W, et al. The impact of poleward moisture and sensible heat flux on Arctic winter sea ice variability. *J Clim*, 2015, 28: 5030–5040

Summary for “北极地区快速升温的驱动机制研究进展”

Recent advances in driving mechanisms of the Arctic amplification: A review

Yunfeng Cao^{1*} & Shunlin Liang²

¹ The College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

² Department of Geographical Sciences, University of Maryland, College Park 20742, USA

* Corresponding author, E-mail: yfcao@bjfu.edu.cn

Under the influence of recent global warming, the Arctic climate is continuing to experience unprecedented changes. Surface temperatures in the Arctic are increasing at a rate double that of the global average, known as the Arctic amplification. The Arctic amplification has led to a series of consequences locally such as the accelerated sea ice retreat, the continuous permafrost melting and methane release, and the marine and terrestrial ecological dynamics. It also might cause an increased frequency of extreme weather event in mid-latitudes via perturbing the strength of the polar vortex. The Arctic warming is mainly resulted from the imbalance of energy budget at both surface and top of atmosphere. In order to explore the driving mechanism of Arctic amplification, lots of efforts have been made based on model simulations and observations. Several major competing theories and related evidences have been proposed to explain their contributions to the imbalance of energy budget over the Arctic. The sea-ice albedo feedback, caused by the continuously shrinking summer sea ice potentially increasing the absorption of shortwave radiation, is believed to play a critical role in recent Arctic amplification. But certain model simulations have indicated that sea-ice albedo feedback was likely not the dominant factor—robust warming amplification still occurs in the Arctic in the absence of albedo feedback. The positive lapse rate feedback, is also thought to cause greater warming at the Arctic surface through damping the deep convection process at the bottom atmosphere because of the strong temperature inversion in the cold Arctic. However, whether the lapse rate feedback plays a dominant role in the Arctic amplification has not been widely accepted. The Planck feedback—cold region requires larger temperature increase than warm area to balance certain external radiative forcing, is also believed to contribute to the Arctic amplification. But the magnitude of its contribution remains to be further quantified. An enhanced Atlantic meridional overturning circulation (AMOC) transporting extraordinary amounts of heat northward to the Arctic Ocean has been hypothesized to substantially amplify Arctic warming and accelerate summer sea-ice melting in this region. However, evidence has instead shown significant slowing of the AMOC over the last few decades. The enhanced greenhouse effect, resulted from the increased water vapor and cloudiness, has been suggested as an important driver of the Arctic winter warming and summer sea-ice dynamics. However, whether the increased water vapor comes from the strengthened sea surface evaporation or from an enhanced atmospheric northward transportation, is still unclear. This paper elucidates the theoretical basis of all potential mechanisms, and systematically reviews the research progress of these theories. Based on the comprehensive analysis of these studies, we point out that due to the limitation of current study approaches, the data quality problems such as scarce in situ measurements, difficulty in discriminating clouds from snow cover for some remote sensing products, problematic parameterization schemes and model inputs in some reanalysis and GCM projects, and the lack of systematic analysis for investigating the internal relations between different climate variables, the conclusions from different studies are discrepant, or even contradictory. The causes of the unprecedented climate change in the Arctic remain unclear and are still under heated debate. Therefore, the development of high quality, long-term radiative product, the optimization of the researching approaches and more accurate quantification of these feedback mechanisms, and the systematic analysis of the potential linkage between different climate variables, will help to advance the study of the Arctic amplification and climate change.

Arctic amplification, sea ice melting, energy budget, radiative feedback, driving mechanism

doi: 10.1360/N972018-00462