

宋伟, 吴志伟, 李跃凤, 等. 2018. 冬季中国东部与北极之间近地面温度变化的年际联系 [J]. 气候与环境研究, 23 (4): 463–478. Song Wei, Wu Zhiwei, Li Yuefeng, et al. 2018. Interannual association of the near-surface temperature between Eastern China and the Arctic in winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (4): 463–478, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17145.

冬季中国东部与北极之间近地面温度变化的年际联系

宋伟^{1,2} 吴志伟³ 李跃凤² 刘春^{2,4}

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

2 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

3 复旦大学大气科学研究所, 上海 200433

4 四川省内江市气象局, 四川内江 641000

摘要 利用 NCEP/NCAR 再分析资料和国家气象信息中心整编的 425 站气温资料, 借助经验正交函数分解 (EOF)、相关分析和回归分析等方法探讨 1956~2015 年冬季北极及中高纬度近地面温度、西伯利亚高压的变化特征以及两者与中国东部气温直接和间接的年际联系。为此定义了 3 个西伯利亚高压指数, 即西伯利亚高压中心强度指数 (SHCI)、西伯利亚高压面积指数 (SHA) 和西伯利亚高压东边界指数 (SHEB)。结果表明: 从 1998 年开始冬季巴伦支海、喀拉海迅速增温, 并在年际尺度上与中国东部气温存在显著的负相关关系, 即北极近地面温度与中国东部气温的直接联系。同时, 西伯利亚高压的 3 个指数也与北极地区近地面温度和中国东部气温有较好的年际关系, 体现了西伯利亚高压是联系北极和东亚气候的桥梁, 当北极近地面温度升高 (降低) 时, 西伯利亚高压中心强度增强 (减弱), 面积扩大 (缩小), 东边界东伸 (西退), 中国东部气温降低 (升高), 即北极近地面温度 (西伯利亚高压) 与中国东部气温的间接 (直接) 联系。最后, 讨论了北极近地面温度变化影响中国东部气温的可能物理机制。

关键词 北极变暖 西伯利亚高压 中国东部气温

文章编号 1006-9585 (2018) 04-0463-16

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17145

Interannual Association of the Near-surface Temperature between Eastern China and the Arctic in Winter

SONG Wei^{1,2}, WU Zhiwei³, LI Yuefeng², and LIU Chun^{2,4}

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081

3 Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200433

4 Neijiang Meteorological Office, Neijiang, Sichuan Province 641000

Abstract Based on the NCEP/NCAR monthly reanalysis dataset and air temperature observations collected at 425 stations in China that is provided by the National Meteorological Information Centre, the spatial and temporal variations

收稿日期 2017-10-09; 网络预出版日期 2018-03-08

作者简介 宋伟, 男, 1994 年出生, 硕士, 主要从事北极与东亚气候研究。E-mail: songwei2016@foxmail.com

通讯作者 李跃凤, E-mail: liyf@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41675095、41730959

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41675095 and 41730959)

of the Siberian high and near-surface temperature over the Arctic and the middle-to-high-latitude region, and their direct and indirect interannual relationships with the air temperature over eastern China in the winter from 1956 to 2015 are explored using Empirical Orthogonal Function (EOF), correlation, and regression analyses, etc. For the above purpose, three Siberian high indexes are defined, including the Siberian high central intensity (SHCI), the Siberian high area (SHA) and the Siberian high eastern boundary (SHEB). The results show that the near-surface warming in the Barents-Kara Sea has rapidly increased in winter since 1998 and presents a significant negative interannual correlation with air temperature in eastern China. This relationship is named as the direct connection between the Arctic and eastern China in the present study. Meanwhile, the interannual associations between the above three indexes and the near-surface temperature over the Arctic and eastern China are significant in winter, suggesting that the Siberian high is a bridge linking the Arctic and East Asian climate to some extent. When the Arctic near-surface temperature increases (decreases), the intensity of the Siberian high enhances (weakens), its coverage expands (shrinks), its eastern boundary extends further eastward (retreats westward), and the temperature decreases (increases) in eastern China. The above relationship is called indirect connection between the Arctic and Eastern China in the present study. Finally, the possible physical mechanisms for the influences of Arctic near-surface temperature on eastern Asia temperature are discussed.

Keywords Arctic warming, Siberian high, Eastern China air temperature

1 引言

北极是大气与海洋物质、能量交换的重要区域之一,在全球气候系统的形成和变化中扮演着很重要的角色。自从 20 世纪 70 年代以来,全球气温持续升高,而北极则是北半球增温幅度最大的区域,到 21 世纪北极增暖已达到全球平均水平的 2 倍,被称为“北极增幅”(也称“北极放大”)现象(Screen and Simmonds, 2010; 赵进平等, 2015)。北极变暖对大气的正/负反馈作用通过遥相关进一步影响其它地区的天气气候(Honda et al., 1999, 2009)。因此,关于北极地区及其影响的研究受到了越来越广泛的关注(陈文和康丽华, 2006; Francis et al., 2009; Wu et al., 2011, 2016; Francis and Vavrus, 2012; Li and Wu, 2012; 陈文等, 2013; 韩哲和李双林, 2013; 司东等, 2014, 2016)。

很多观测资料和数值模拟的研究表明,北极海冰与欧亚大陆天气气候异常在年际尺度上存在着十分明显的联系,如:何金海等(2015)研究发现,当秋季北冰洋西南边缘的巴伦支海、喀拉海和拉普捷夫海西部(75°N~85°N, 30°E~120°E)海冰偏少时,冬季北大西洋涛动易呈现负位相,北大西洋吹往欧亚大陆的暖湿气流减弱和欧亚大陆北风的加强导致欧亚大陆中高纬地区温度降低。Li and Wang (2013)的研究也表明秋季北极海冰减少,输送到西伯利亚地区的水汽将变多,使该地区的春季降雪增多,通过辐射冷却和大尺度下沉运动的作用,西伯利亚高压增强,有利于冷空气向南爆发,

导致东亚春季气温偏低。而当冬季挪威海和巴伦支海海冰偏少时,会在欧亚大陆激发出罗斯贝波列,使蒙古高原出现低压异常中心,进一步导致东亚副热带急流增强,伴随着低层辐合,高层辐散,局地对流运动增强,最终使东亚春季降水增多(Wu et al., 2016)。

冬季西伯利亚高压对东亚冬季气候具有显著的影响(Ding and Krishnamurti, 1987; Ding, 1990),其强度可以单独用来描述东亚冬季风的变率(Wu et al., 2006)。当西伯利亚高压偏强时,通常中国大部分地区冬季气温偏低(龚道溢等, 2002; 王遵娅和丁一汇, 2006; 孙晓娟等, 2010)。很多研究指出,冬季西伯利亚高压与中高纬度地区的冷空气活动和北极涛动(Arctic Oscillation, AO)均有联系,因此西伯利亚高压成为连接北极和东亚气候变化的桥梁(Gong et al., 2001; Wu and Wang, 2002)。

在气候变暖的背景下,东亚地区最近十几年冬季气温变化的不稳定性增加,冬季极端冷事件变得更为频繁和强烈(马晓青等, 2008; 丁一汇等, 2008; 梁苏洁等, 2014; 司东等, 2016),对交通、电力、能源和农业等方面都造成了十分恶劣的影响。以往的研究多集中于探讨北极海冰与东亚冬季气候的联系(武炳义等, 1999; 解小寒和杨修群, 2006; Honda et al., 2009; 高清清等, 2011),也证明北极海冰对冬季东亚极端天气气候事件有着十分重要的影响,但是对于北极近地面温度异常与东亚冬季气候关联的研究相对较少。大气对于北极海冰的响应十分复杂,取决于背景大气的状态和季节(Deser et al., 2010; Tang et al., 2013; Kug et al., 2015),

这可能会削弱北极海冰与大气的统计关系。事实上, 大气对北极下垫面热力强迫的响应是对与北极海冰有关的近地面温度异常的响应而不是对北极海冰本身 (Li and Leung, 2013)。因此, 本文将首先分析冬季北极近地面温度的变化特征, 及其与中国东部气温在年际尺度上的直接联系。尽管以往对于西伯利亚高压已经有不少的研究, 但对于西伯利亚高压的研究仍需进一步完善, 所以本文定义了 3 个西伯利亚高压指数, 并探讨它们与北极近地面温度和中国东部气温的联系, 进一步揭示西伯利亚高压在北极与东亚气候变化关系中的桥梁作用, 即北极近地面温度变化与中国东部气温在年际尺度上的间接联系, 然后讨论了冬季北极近地面温度影响中国东部气温变化的可能物理机制, 最后给出本研究的主要结论和相关讨论。

2 资料与方法

本研究所用的资料包括: 1) NCEP/NCAR 提供的全球逐月再分析资料 ([http://www.esrl.noaa.gov/psd/\[2017-08-20\]](http://www.esrl.noaa.gov/psd/[2017-08-20])), 包含海平面气压场、位势高度场、风场和 2 m 气温场, 其中海平面气压场、位势高度场和风场的水平分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度), 即全球共有 73×144 个格点; 2 m 气温场为 T62 高斯格点资料, 全球共有 94×192 个格点, 选取的时间段均为 1956~2016 年 (Kalnay et al., 1996); 2) 戈达德太空研究所 (GISS) 提供的全球地表温度资料, 水平分辨率为 2° (纬度) $\times 2^\circ$ (经度), 选取的时间段同样为 1956~2016 年 ([https://data.giss.nasa.gov/gistemp/\[2017-08-20\]](https://data.giss.nasa.gov/gistemp/[2017-08-20])); 3) 国家气象信息中心整编的中国地面月平均气温资料, 筛选出 1956~2015 年 60 个连续冬季各月均无缺测的 425 个站点。本文中的冬季均为当年 11 月至次年 2 月, 例如 1979 年冬季指 1979 年 11 月至 1980 年 2 月。

依据 Wu and Wang (2002) 使用的西伯利亚高压气候平均的位置 ($40^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$, $80^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$), 定义了西伯利亚高压中心强度、面积和东边界指数。即在该范围内海平面气压的最大值记为西伯利亚高压中心强度指数 (Siberian high central intensity, SHCI); 海平面气压值大于 1028 hPa 的格点总数记为西伯利亚高压面积指数 (Siberian high area, SHA); 1028 hPa 等值线所处的最东经度值记

为西伯利亚高压的东边界指数 (Siberian high eastern boundary, SHEB) [由于西伯利亚高压的范围存在年际变化, 所以实际选取面积和东边界指数时对 Wu and Wang (2002) 定义的范围有一定扩展]。

本研究将利用经验正交函数分解 (Empirical Orthogonal Function, EOF)、功率谱分析、相关分析、回归分析、MK 突变检验、 t 检验和 z 检验等相关统计方法 (魏凤英, 1999), 探讨北极及中高纬度近地面温度的时空特征和西伯利亚高压的变化, 为了研究两者与中国东部气温在年际尺度上直接和间接的关联, 对资料进行 9 年高通滤波的处理。

3 冬季北极近地面温度与东亚气温的联系

3.1 北极及中高纬度近地面温度的时空特征和气温指数的定义

冬季北极及中高纬度 (55°N 以北) 2 m 气温距平 EOF 分解第一模态 (图 1a1) 方差贡献为 37.56%, 空间分布显示在北极地区均为正异常, 表示自 1956 年以来北极地区呈现一致性温度变化形势, 其中温度变化幅度最大的区域位于巴伦支海和喀拉海北部。第一模态的时间系数 (Principal Component 1, PC1) 表现出很明显的上升趋势 (图 1b1), 线性趋势为 0.0615 a^{-1} , 通过了 0.05 的显著性检验。在 1998 年之前, 时间系数主要为负值, 而从 1998 年开始, 时间系数均为正值, 远大于之前十几年时间系数的绝对值。表明在研究的 60 年期间, 北极及中高纬度近地面温度的第一模态在 1998 年发生了显著的位相转变。PC1 功率谱分析的结果 (图略) 显示, 北极及中高纬度除明显的气候变暖趋势外, 还存在显著的年际变化, 其周期为 2.5 年。第二模态 (图 1a2) 方差贡献为 14.31%, 空间分布表现为巴伦支海、喀拉海以南欧亚大陆为温度负异常, 而格陵兰岛到加拿大西北部为温度正异常, 正异常中心位于巴芬湾区域, 表示 1956 年以来这两个地区的近地面温度呈现相反的变化形势。第二模态的时间系数 (Principal Component 2, PC2) 没有呈现显著的气候变化倾向 (图 1b2), 而呈现出明显的年际变化特征, 显著周期为 2.7 年和 3.3 年 (图略)。

利用 NCEP/NCAR 再分析资料中的近地面 2 m 气温, 分析北半球 ($20^\circ\text{N} \sim 90^\circ\text{N}$) 温度变化的线性趋势 (图 2a) 可知, 1998 年之后北极地区呈现明

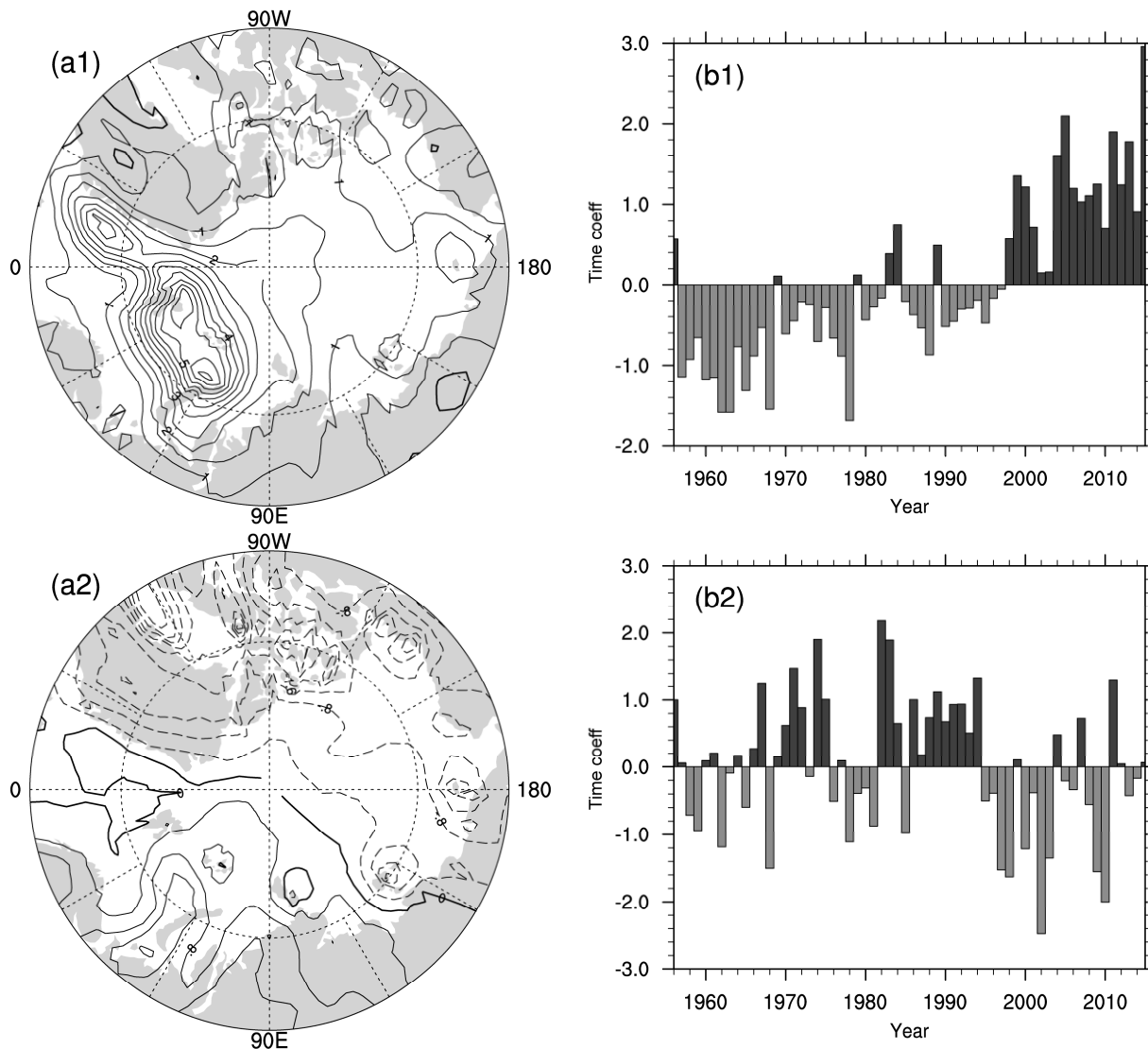


图1 1956~2015年冬季2 m气温距平(55°N~90°N) EOF分解(a1)第一模态及其(b1)时间系数PC1、(a2)第二模态及其(b2)时间系数PC2(等值线间隔为0.5)

Fig. 1 (a1) Spatial pattern (55°N~90°N) and (b1) the corresponding time coefficient of the first EOF mode of 2-m air temperature anomaly in the winter during 1956~2015; (a2) and (b2) are the same as (a1) and (b1), but for the second EOF mode (the contour interval is 0.5 K)

显的变暖趋势, 增暖速度超过 0.1 K a^{-1} , 升温较快的区域位于巴伦支海、喀拉海, 最强的增暖速度超过 0.5 K a^{-1} ; 相反, 东亚则表现为明显的降温趋势。同样, 利用戈达德太空研究所(GISS)提供的全球地表温度资料, 分析北半球($20^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$)地表温度变化的线性趋势分布(图2b), 也同样发现明显的北极增温和东亚降温的趋势。这与通常所说的“暖北极—冷大陆”形势类似(Tang et al., 2013)。因为巴伦支海、喀拉海($66^{\circ}\text{N}\sim 82^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\text{E}\sim 75^{\circ}\text{E}$)既是北极及中高纬度近地面温度第一模态中增温幅度最大的区域(图1a1), 也是1998年以后气温

变化线性趋势最为明显的区域(图2a和2b), 因此, 本文将其定为北极增温关键区, 关键区冬季2 m气温的区域平均定义为气温指数, 用其标准化时间序列表征北极近地面温度的变化特征。在1956~2015年期间气温指数表现出很强的年际变率和上升趋势(图2c), 其显著周期为2.5年(图略), 线性趋势为 0.13 K a^{-1} , 通过了0.05的显著性检验。气温指数与PC1的相关系数高达0.90, 通过了0.01的显著性检验, 表明关键区近地面温度与北极及中高纬度近地面温度主要模态的变化趋势基本一致。图2c中柱状图为气温指数经过9年高通滤波处理后的

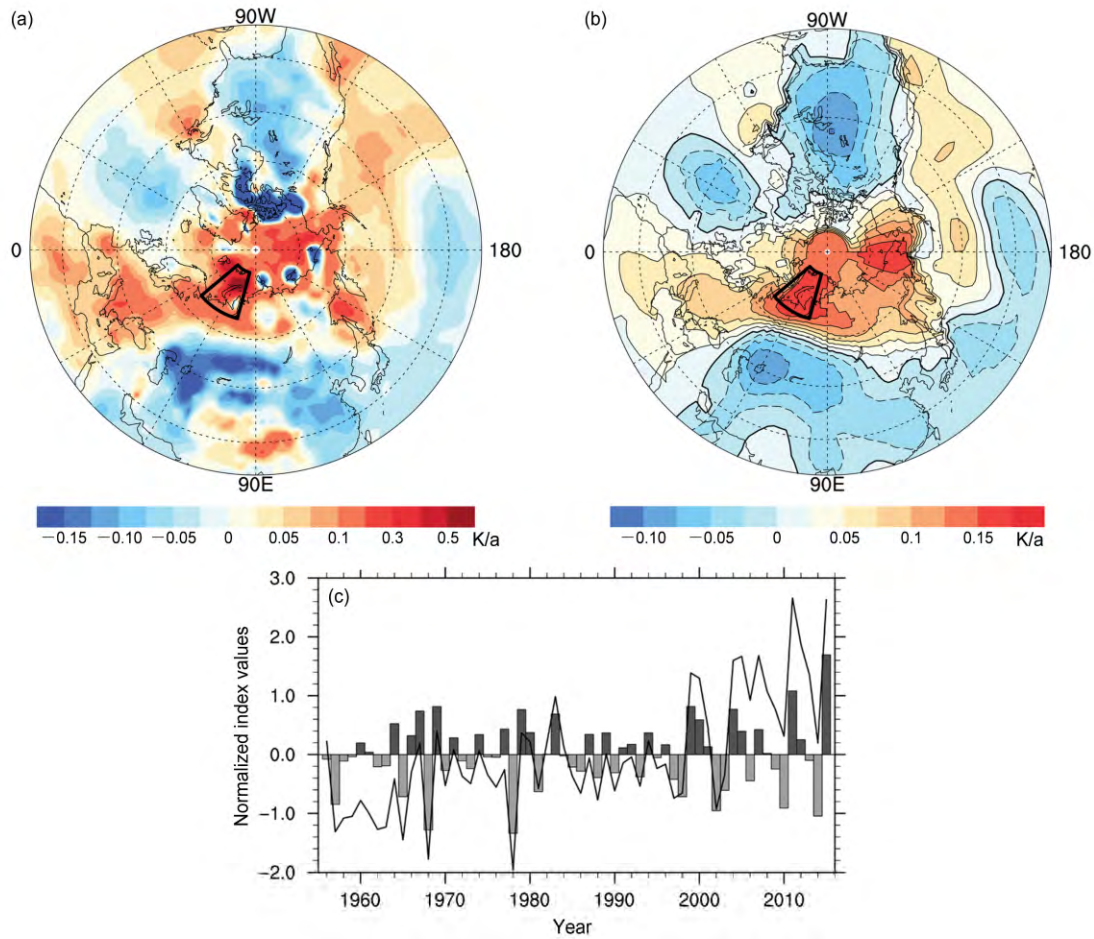


图2 1998~2015年冬季北半球(20°N~90°N) (a) 2 m 气温和 (b) 地表温度变化的线性趋势[黑色框内区域为巴伦支海、喀拉海海域(66°N~82°N, 40°E~75°E)], (c) 1956~2015年气温指数原始序列(实线)和年际变化分量序列(柱状)
Fig. 2 Linear trends of (a) 2-m air temperature and (b) surface temperature in the Northern Hemisphere (20°N~90°N) in the winter during 1998~2015 [the domain enclosed by the thick line denotes the Barents-Kara Sea region (66°N~82°N, 40°E~75°E)]; (c) The normalized time series of unfiltered air temperature index (solid line) and interannual component of air temperature index (bars) during 1956~2015

年际变化分量, 功率谱分析的结果表明其显著周期为 2.7 年和 4.2 年(图略)。

3.2 北极近地面温度主要模态及气温指数与中国气温的联系

冬季北极海冰和同期东亚冬季风的强弱关系密切, 即当该海域海冰减少时, 东亚冬季风加强, 进而使我国大部分地区冬季偏冷(武炳义等, 1999; 解小寒和杨修群, 2006; 高清清等, 2011)。冬季气温指数与同期中国区域相关分析(图 3a)表明, 当北极近地面温度升高时通常伴随着中国大部分地区气温的升高, 只有华北、东北和西南的部分地区气温将降低。将气温指数的年际变化分量与同期中国气温做相关分析(图 3b)发现, 伴随着气温指数的升高, 中国大部分地区主要呈现降温趋势, 相

关系数分布表现为 105°E 以东大部分区域显著负相关, 最大负相关系数达到 -0.55, 通过 0.01 的显著性检验。这与之前很多研究的结论一致(Honda et al., 2009; Tang et al., 2013; Cohen et al., 2014; Kug et al., 2015)。同样, PC1 与中国大部分地区气温存在较为显著的正相关关系(图 3c), 而 PC2 与东北和西北部分地区气温为负相关关系, 与西南和华南地区为正相关关系(图 3d)。气温指数的原始序列和年际变化分量序列与同期中国气温相关分析的结果表明: 强势的冬季北极气候增温倾向会促使中国大部分地区也呈现变暖趋势, 但就冬季北极近地面温度年际变化的分量而言, 其主要导致冬季中国呈现变冷的形势。换言之, 当冬季北极气候变暖倾向大于年际变化分量的影响时, 中国主要出现

暖冬；而当冬季北极近地面温度年际变化分量的影响大于其气候倾向的影响时，中国则主要出现冷冬。图 4 为气温指数年际变化分量与滞后 1 个月中国气温的相关分析，由图可以看出，在年际尺度上，10 月气温指数与 11 月中国气温主要为负相关（图 4a），负相关最明显区域的相关系数达到 -0.32 ，通过 0.05 的显著性检验，主要位于华中地区。11 月气温指数与 12 月中国东部气温均为负相关，并且相关关系增强（图 4b），特别是华南、华东、江淮流域、华中、内蒙古西南部以及东北和西北部分地区为显著的负相关，即通过了 0.05 的显著性检验。12 月气温指数与次年 1 月中国东部气温的相关关系表现为华南负相关，华中和华东正相关，华北和东北正负相关相间分布（图 4c），但都没有通过 0.05 的显著性检验。1 月气温指数与 2 月中国气温的相关关系又变得比较明显（图 4d），华南、华东、华北、东北和西北地区均有较强的负相关关系，负相关系数达到 -0.54 。综上，12 月和 2 月中国东部大部分地区气温分别与 11 月和 1 月气温指数存在显著的负相关关系，即 11 月和 1 月关键区近地面温度可以分别作为 12 月和 2 月中国东部气温一个重要的预报因子。

4 冬季西伯利亚高压与北极及中国近地面温度的年际联系

为了详细地分析西伯利亚高压在北极与东亚气候关系中起到的作用，在海平面气压场上定义了 3 个西伯利亚高压指数——中心强度、面积和东边界指数。从距平时间序列（图 5）可以看出，1 月中心强度、面积和东边界的气候平均表现为最强、最大和最偏东（1041.32 hPa、128.50、129.64°E），12 月（1040.22 hPa、116.92、127.09°E）和 2 月（1037.89 hPa、87.57、124.29°E）次之，而 11 月气候平均的西伯利亚中心强度最弱、面积最小和东边界最偏西（1035.59 hPa、59.63、110.07°E）。

秋末初冬的 11 月，西伯利亚高压中心强度（图 5a）在 1998 年以前中心强度强弱位相交替，最强的中心强度达到 1042.44 hPa，最弱的中心强度为 1028.61 hPa，而从 1998 年之后，中心强度振幅变小，振幅范围为 1031.13~1038.81 hPa，表现出明显的减弱趋势，线性趋势为 -0.11 hPa/a。面积指数（图 5b）的变化形势与中心强度指数类似，同样在

1998 年之前面积指数强弱位相交替出现，最大和最小的面积分别为 148 和 2，而从 1998 年开始面积在 9~106 范围内振荡。11 月西伯利亚高压东边界移动的范围（图 5c）在 90°E~133.5°E 之间，平均位于 110.07°E，东边界在整个时间段内呈现出西退的趋势，线性趋势为 $-0.05^\circ \text{a}^{-1}$ 。12 月，相比 11 月中心强度有所增强，面积扩大，东边界东伸。中心强度在整个研究的 60 年中表现为由强到弱，又由弱到强的演变形势，1980 年代后期为演变的转折时期。面积的变化趋势与中心强度相似，即 1980 年代后期之前为由大到小，之后为由小变大。东边界在 1970 年代中期之前东西向摆动幅度较大，而在 1970 年代中期至 1990 年代后期在 116.7°E~132°E 范围内小幅度东西摆动，1990 年代后期开始，东边界开始呈现比较明显的东伸趋势，线性趋势为 0.37°a^{-1} 。1 月，相比 12 月，中心强度、面积和东边界都进一步增强、扩大和东伸，并达到冬季的最强、最大和最偏东。中心强度和面积的演变分为以下 3 个阶段：1950 年代中期至 1970 年代初期，中心强度变弱、面积缩小，1970 年代至 1990 年代初期中心强度和面积变化幅度较小，1990 年代初期开始中心强度出现增强的倾向、面积扩大，线性趋势分别为 0.11 hPa a^{-1} 和 1.12 a^{-1} 。东边界在 1990 年代之后相对 1990 年代之前东西摆动幅度增大，即东边界在 1 月频繁出现更为东伸的形势。2 月，中心强度相比于 1 月减弱，面积缩小，东边界西退。中心强度在 1956~2015 年线性趋势不明显。面积在本文研究的时间段内都表现出比较明显的年际变化特征。而 2 月东边界的年际变率是整个冬季最明显的月份，即东西摆动幅度最大，特别是 1970 年代中期之前和 2000 年代之后相对于 1970 年代至 2000 年代之间东西摆动幅度更为显著。

21 世纪之后，中国地区发生了几次较为明显的极端冷事件，主要发生在冬季的 1 月，特别是 2004/2005 年冬季（马晓青等，2008）、2007/2008 年冬季（Zhou et al., 2011）、2010/2011 年冬季（陈洪滨和范学花，2012）和 2015/2016 年冬季（司东等，2016）。从西伯利亚高压中心强度上来看，这 4 个冬季 1 月西伯利亚高压中心强度分别为 1044.46 hPa、1047.87 hPa、1051.40 hPa 和 1049.48 hPa，面积分别为 142、187、185、174，均大于气候平均值，东边界分别为 132.5°E、129°E、143°E、126°E，其中 2005 年和 2011 年东边界较

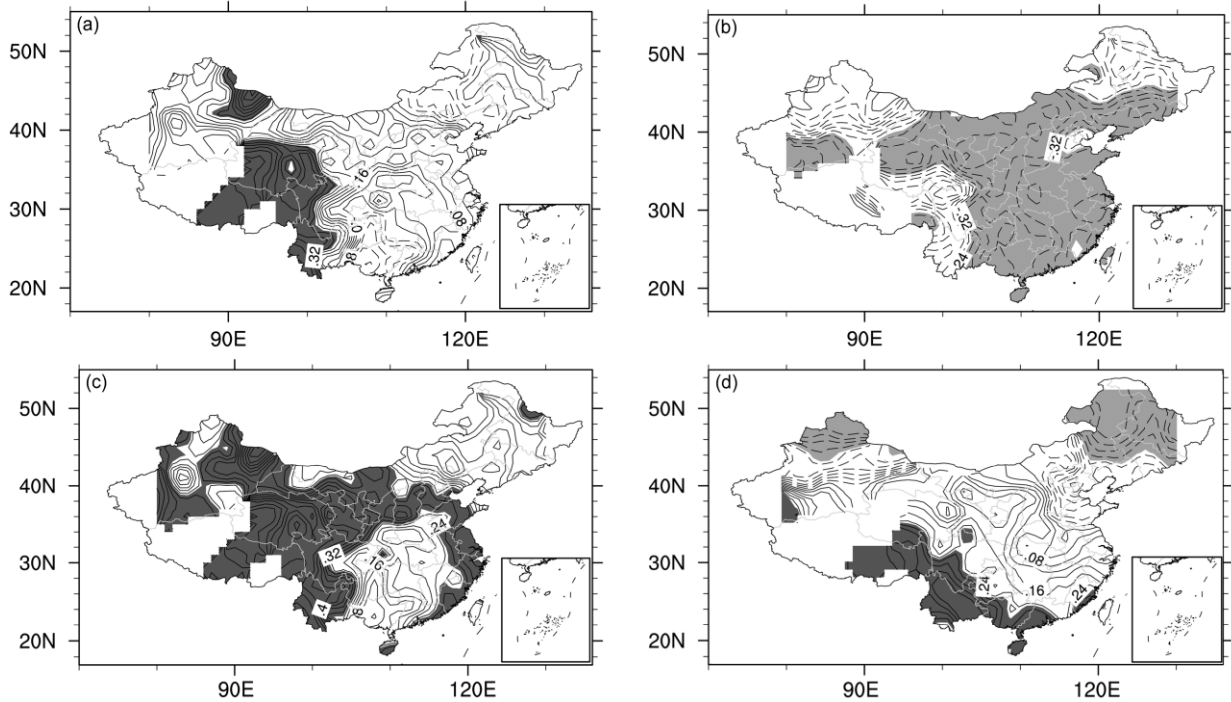


图 3 1956~2015 年冬季气温指数和北极近地面温度主要模态时间系数与中国气温的相关系数：(a) 气温指数；(b) 气温指数年际变化分量；(c) PC1；(d) PC2（实线为正相关，虚线为负相关，等值线间隔为 0.04，阴影表示通过 0.05 的显著性检验）
 Fig. 3 Correlation coefficient between (a) unfiltered winter air temperature index and simultaneous air temperature in China during 1956~2015; (b), (c), and (d) are the same as (a) but for the interannual component of air temperature index, PC1, and PC2, respectively (solid line: Positive correlation; dashed line: Negative correlation; the contour interval is 0.04 and the shadings exceed the 95% confidence level)

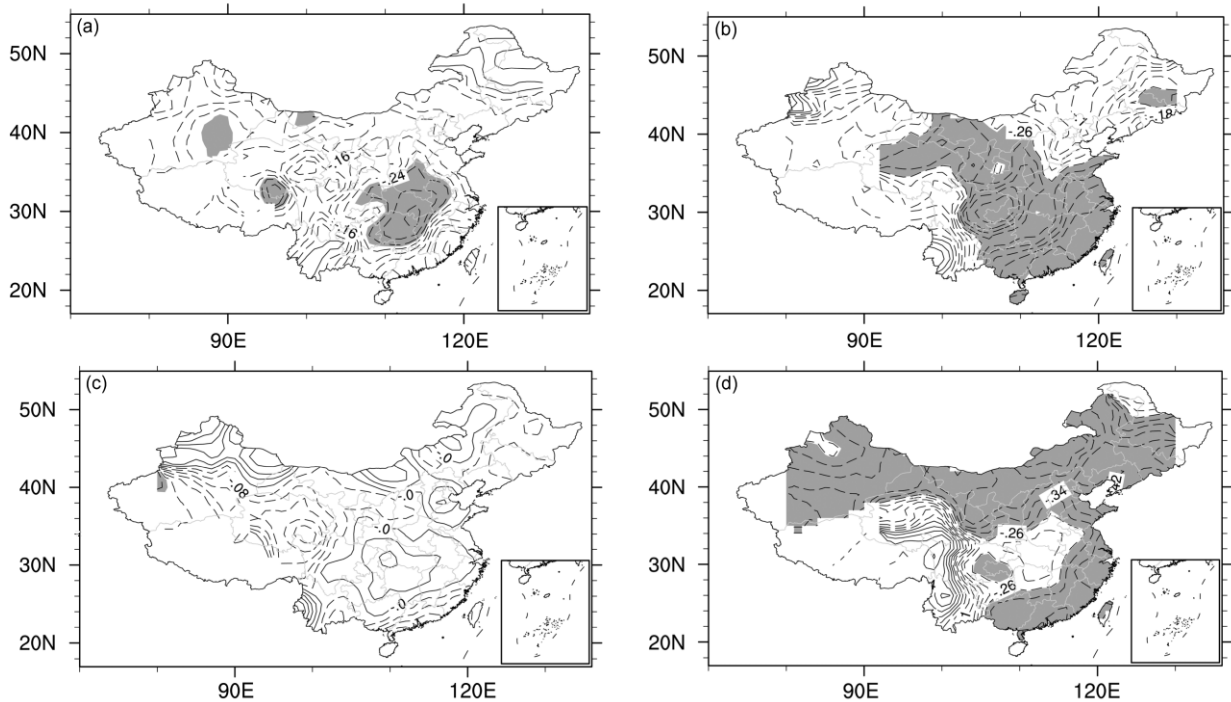


图 4 1956~2015 年冬季各月气温指数年际变化分量与滞后 1 个月中国气温的相关系数：(a) 10 月与 11 月；(b) 11 月与 12 月；(c) 12 月与次年 1 月；(d) 1 月与 2 月（实线为正相关，虚线为负相关，等值线间隔为 0.04，阴影表示通过 0.05 的显著性检验）
 Fig. 4 Correlation coefficients between (a) Oct interannual component of air temperature index and air temperature in China that lags one month; (b), (c), and (d) are the same as (a) but for Nov, Dec, and Jan, respectively (solid line: Positive correlation; dashed line: Negative correlation; the contour interval is 0.04 and the shadings exceed the 95% confidence level)

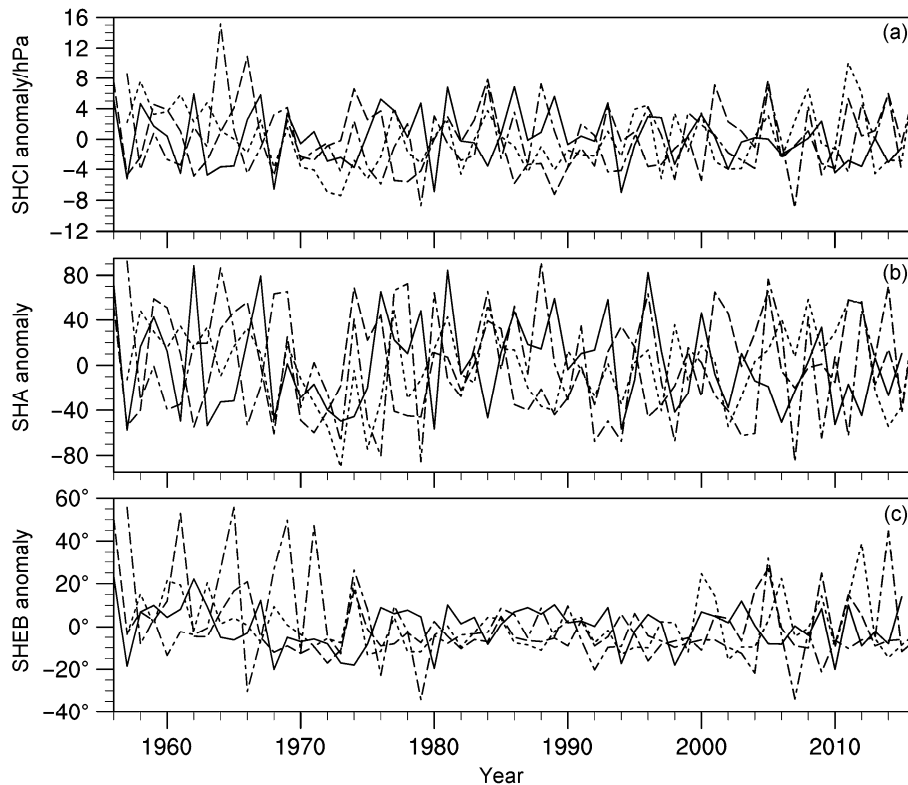


图5 1956~2015年冬季3个西伯利亚高压指数的距平时间序列:(a)中心强度;(b)面积;(c)东边界(实线:11月;长虚线:12月;短虚线:1月;点划线:2月)

Fig. 5 Time series of (a) Siberian high central intensity (SHCI), (b) Siberian high area (SHA), and (c) Siberian high eastern boundary (SHEB) anomalies in winter during 1956–2015 (solid line: Nov; long dashed line: Dec; short dashed line: Jan; dot dashed line: Feb)

气候平均而言偏东。这表明西伯利亚高压中心强度、面积和东边界的异常对于冷冬事件的出现均具有重要的作用。

由冬季西伯利亚高压中心强度,面积和东边界指数的年际变化分量与同期2 m气温的相关系数分布(图6)可以看出,从11月到次年2月,3个指数与同期2 m气温均呈现出北极和高纬度地区显著正相关,特别是在北极关键区(图6矩形框内区域),而在欧亚大陆中纬度地区表现为显著负相关,即当北极和高纬度地区近地面温度升高(降低)时,西伯利亚高压中心强度增强(减弱),面积扩大(缩小),东边界东伸(西退),而欧亚大陆,特别是东亚中纬度地区近地面温度降低(升高),再次表明了年际尺度上西伯利亚高压是连接北极和东亚气候的桥梁。

为了进一步研究西伯利亚高压与中国东部不同地区气温在年际尺度上的联系,将中国东部划分为以下4个区域:东北地区(42°N~52°N, 120°E~130°E)、华北地区(35°N~42°N, 110°E~120°E)、

江淮流域(27.5°N~35°N, 110°E~120°E)和华南地区(22.5°N~27.5°N, 110°E~120°E)。各个地区气温的区域平均时间序列(图7a-d)显示,4个区域的气温都呈现出上升趋势,且4个区域气候平均气温的高低关系均为:11月>2月>12月>1月,这与3个西伯利亚高压指数的大小关系恰好相反,表明西伯利亚高压强度和空间的变化均与中国东部冬季气温存在重要年际联系。例如:21世纪后中国地区出现的几次较为明显的冷事件均可以从图7反映出来,华北(图7b)、江淮流域(图7c)和华南地区(图7d)的1月气温在2005年、2008年、2011年和2016年出现了极小值,特别是2011年1月,这3个区域的气温达到了21世纪以来的最小值。将西伯利亚高压中心强度、面积和东边界指数的年际变化分量与4个区域气温做同期和滞后相关分析发现,3个指数与同期中国东部气温均具有很好的负相关关系(表1~3),且这种负相关关系可以从11月持续到次年2月,即当中心强度增强(减弱),面积扩大(缩小),东边界东伸(西

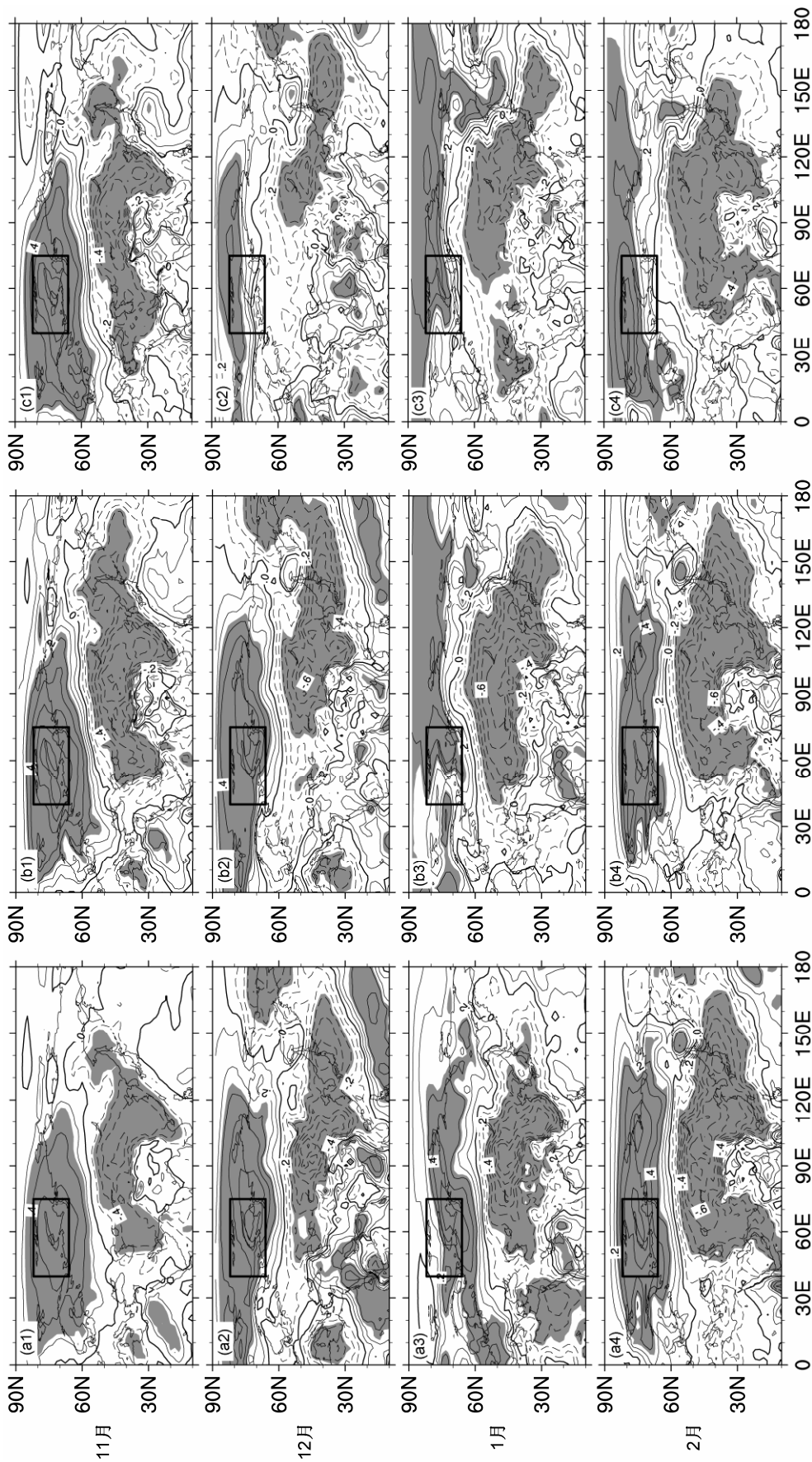


图6 1956~2015年11月、12月、1月、2月西伯利亚高压指数年际变化量和同期2 m 气温的相关系数: (a1、a2、a3、a4) 中心强度; (b1、b2、b3、b4) 面积; (c1、c2、c3、c4) 东边界[黑色框内区域为巴伦支海、喀拉海海域 (66°N~82°N, 40°E~75°E)], 实线为正相关, 虚线为负相关, 等值线间隔为0.04, 阴影表示通过0.05的显著性检验

Fig. 6 Correlation coefficients between (a1) Nov, (a2) Dec, (a3) Jan, and (a4) Feb interannual components of SHCI and simultaneous 2-m air temperature during 1956~2015. Panels in the middle row and the right row are the same as those in the left row but for SHA and SHEB, respectively [the domain enclosed by thick line in each panel denotes the Barents-Kara Sea region (66°N~82°N, 40°E~75°E); Solid line: Positive correlation; dashed line: Negative correlation; the contour interval is 0.04 and the shadings exceed the 95% confidence level]

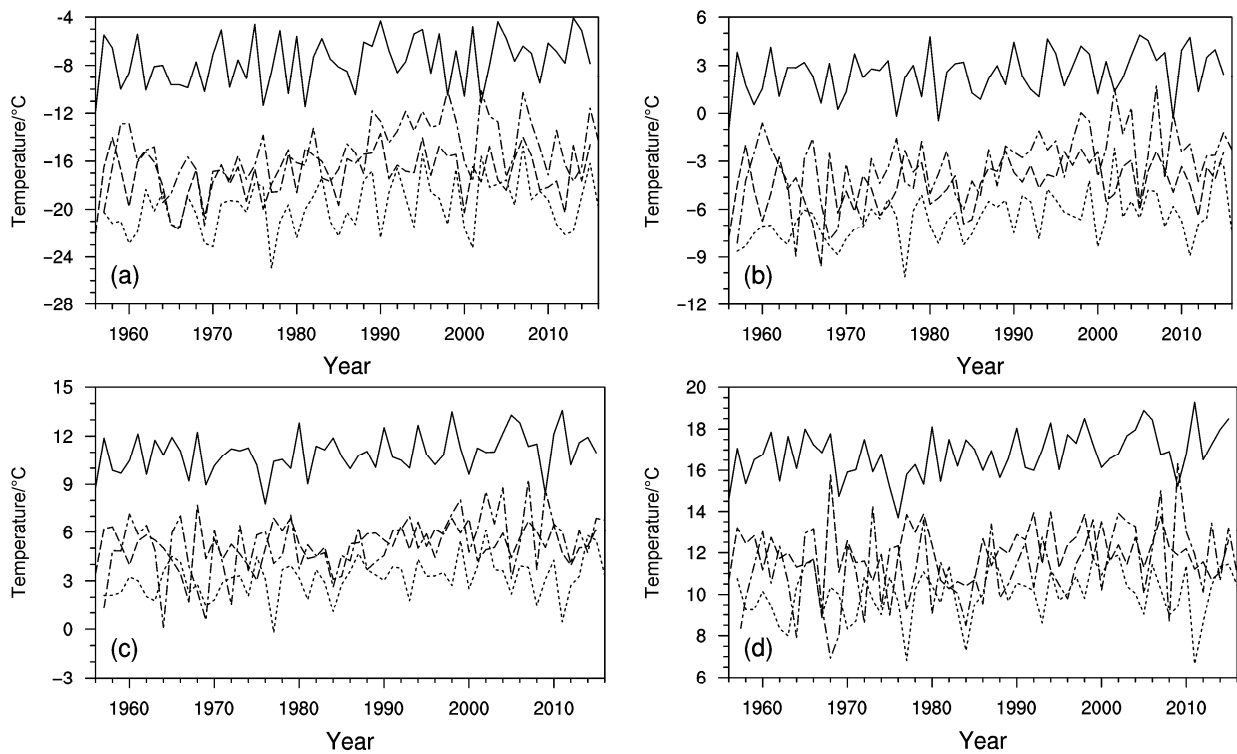


图7 1956~2015年冬季中国 (a) 东北地区、(b) 华北地区、(c) 江淮流域和 (d) 华南地区气温的时间序列 (实线: 11月; 长虚线: 12月; 短虚线: 1月; 点划线: 2月)

Fig. 7 Time series of winter air temperature in (a) Northeast China, (b) North China, (c) the Yangtze-Huaihe River basin, and (d) South China during 1956-2015 (solid line: Nov; long dashed line: Dec; short dashed line: Jan; dot dashed line: Feb)

退) 时, 中国东部同期气温降低 (升高), 特别是在华北和江淮流域的相关程度最大, 相关系数达到 -0.81 。

表 1 1956~2015 年冬季西伯利亚高压中心强度指数 (SHCI) 年际变化分量和同期中国东部地区气温相关系数
Table 1 Correlation coefficients between interannual component of SHCI and simultaneous eastern China air temperature in the winter during 1956-2015

	相关系数			
	11月 SHCI	12月 SHCI	1月 SHCI	2月 SHCI
东北气温	-0.32*	-0.23	-0.18	-0.52*
华北气温	-0.70*	-0.54*	-0.53*	-0.81*
江淮气温	-0.78*	-0.52*	-0.71*	-0.71*
华南气温	-0.64*	-0.34*	-0.74*	-0.73*

*通过了 0.05 的显著性检验。

表 2 同表 1, 但为西伯利亚高压面积指数 (SHA)
Table 2 Same as Table 1, but for SHA

	相关系数			
	11月 SHA	12月 SHA	1月 SHA	2月 SHA
东北气温	-0.46*	-0.51*	-0.56*	-0.44*
华北气温	-0.74*	-0.68*	-0.63*	-0.75*
江淮气温	-0.77*	-0.57*	-0.70*	-0.69*
华南气温	-0.54*	-0.27*	-0.55*	-0.68*

*通过了 0.05 的显著性检验。

表 3 同表 1, 但为西伯利亚高压东边界指数 (SHEB)
Table 3 Same as Table 1, but for SHEB

	相关系数			
	11月 SHEB	12月 SHEB	1月 SHEB	2月 SHEB
东北气温	-0.31*	-0.29*	-0.55*	-0.44*
华北气温	-0.61*	-0.36*	-0.46*	-0.51*
江淮气温	-0.67*	-0.23	-0.46*	-0.54*
华南气温	-0.38*	0.04	-0.32*	-0.48*

*通过了 0.05 的显著性检验。

5 中国东部冬季气温与北极近地面温度年际变化关联的机理

本文第 3 部分的研究表明, 巴伦支海、喀拉海是冬季近地面温度变化最大的区域, 而且从 1998 年开始迅速增温, 因此定义该区域为关键区, 其 2 m 气温区域平均作为气温指数, 气温指数年际变化分量与中国东部气温存在显著的负相关关系。本部分用气温指数年际变化分量与同期海平面气压、500 hPa 位势高度场、1000~500 hPa 厚度场和 500 hPa 纬向风场进行回归分析。

本文第 4 部分的研究进一步表明: 西伯利亚高

压的面积、位置不是固定不变的，同时其强度、面积和位置的改变会导致中国东部气温发生明显的变化。当西伯利亚高压中心强度增强（减弱），面积扩大（缩小），东边界东伸（西退）时，中国东部气温将会降低（升高）。由海平面气压对气温指数年际变化分量的回归分析（图 8a）可以看出，当气温指数升高时，西伯利亚高压中心强度增强，面积扩大，东边界东伸，会导致中国东部出现冷冬。而当气温指数降低时，中心强度减弱，面积缩小，东边界西退，中国东部出现暖冬。再一次表明西伯利亚高压是联系北极和东亚气候的重要桥梁，即北

极增温→西伯利亚高压中心强度增强、面积扩大和东边界东伸→中国东部降温。

另外，由图 8a 可以看出，当气温指数升高时，贝加尔湖西北侧存在一海平面气压正异常中心，并向东南伸展到东亚地区，表明西伯利亚到东亚地区海平面气压均会升高，在东亚沿岸附近有异常强的偏北风，有利于高纬度的冷空气输送到东亚中纬度和副热带地区。而北太平洋上海平面气压降低，表明阿留申低压加深增强。增强的西伯利亚高压和阿留申低压均有利于东亚冷冬的出现。500 hPa 位势高度场对气温指数年际变化分量的回归分析发现

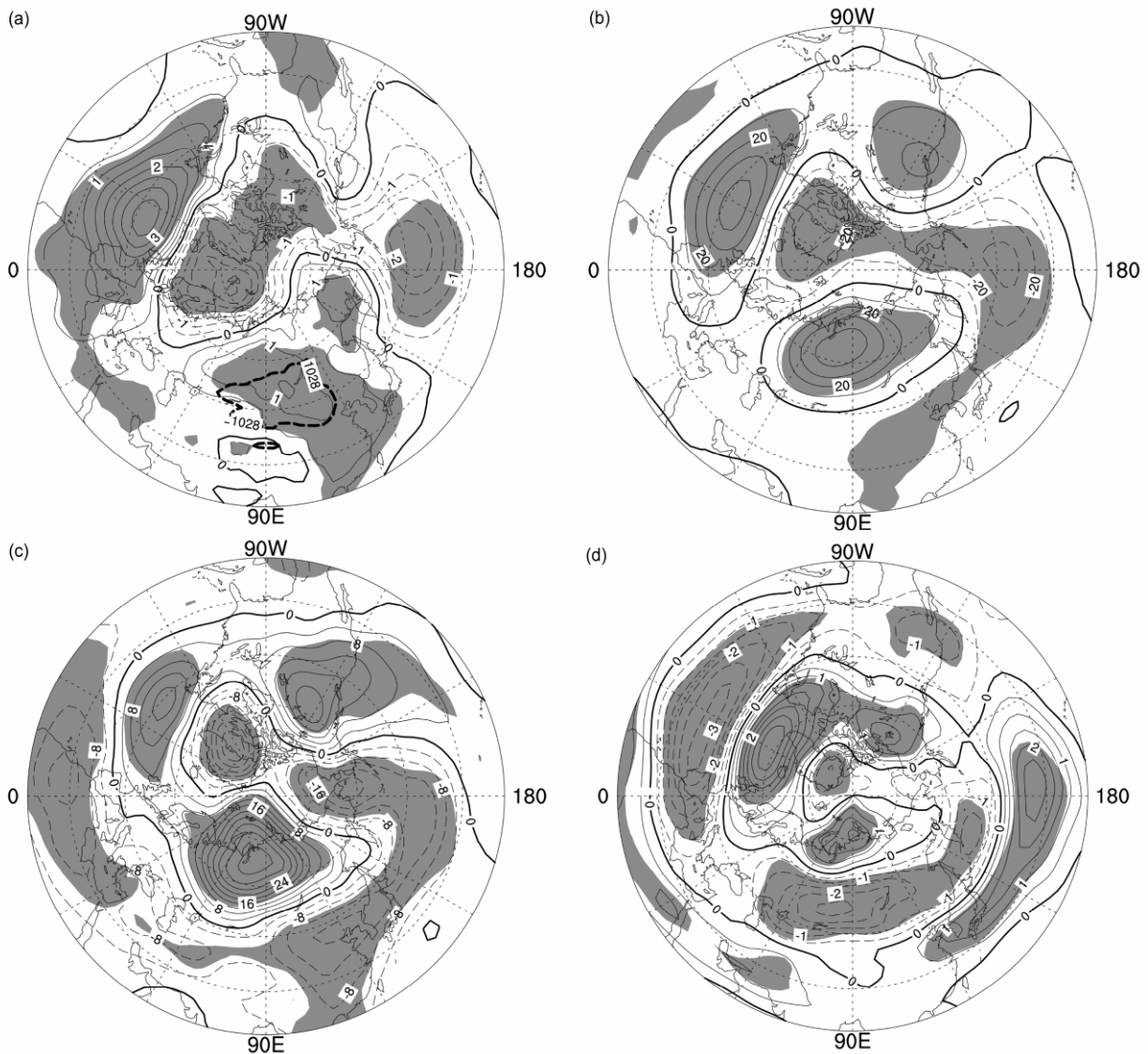


图 8 1956~2015 年冬季 (a) 海平面气压 (单位: hPa, 粗虚线为 1028 hPa 等值线), (b) 500 hPa 位势高度 (单位: gpm), (c) 1000~500 hPa 厚度 (单位: gpm) 和 (d) 500 hPa 纬向风 (单位: m/s) 对气温指数年际分量回归系数分布 (阴影表示通过 0.05 的显著性检验)

Fig. 8 Regression coefficients of anomalous (a) sea level pressure (hPa) in the subtropical and middle-to-high-latitude areas (20°N–90°N) regressed onto the interannual component of air temperature index (thick dashed line is the 1028-hPa contour line); (b), (c), and (d) are the same as (a), but for 500-hPa geopotential height (gpm), 1000–500-hPa thickness (gpm) and 500-hPa zonal wind (m/s), respectively (the shadings exceed the 95% confidence level)

(图 8b), 当气温指数升高时, 从乌拉尔山附近地区到鄂霍次克海均为位势高度正异常, 表明乌拉尔山、贝加尔湖和鄂霍茨克海阻高易偏强, 特别是贝加尔湖阻高可能更易得到发展。由西伯利亚高压指数[定义为(40°N~60°N, 80°E~120°E)范围内海平面气压的平均](Wu and Wang, 2002)与位势高度的相关系数的垂直分布(图 9)可以看出, 在高层自西向东存在“负—正—负”的波列与西伯利亚高压的增强有关, 位势高度正异常在乌拉尔山地区较为显著, 该正异常信号向东向下传播到西伯利亚高原, 最终导致西伯利亚高压增强。这表明当北极近地面温度升高(降低)时, 有利(不利)于乌拉尔山阻塞高压建立和发展, 进一步使西伯利亚高压增强(减弱), 导致中国东部气温降低(升高)。数值模拟的结果也表明北极海冰减少(即近地面温度升高)对乌拉尔山阻塞高压的形成有激发作用(韩哲和李双林, 2013), 并且 Wang et al. (2010) 指出, 在年际尺度上, 乌拉尔山阻塞活动与西伯利亚高压和东亚冬季气候均具有较好的联系。这些又体现了西伯利亚高压是联系北极和东亚气候的重要桥梁, 即北极增温→欧亚阻塞高压发展→西伯利亚高压增强→中国东部降温。

Francis et al. (2009) 研究指出, 当夏季北极海冰偏少时, 后期秋冬季高纬度地区由于对流层低层的加热作用导致大气的垂直几何厚度增加, 使得中高纬之间厚度经向梯度变小。作为大气纬向风的驱动力之一的厚度梯度, 与纬向风满足热成风关系式(朱乾根等, 2007), 其减小将导致纬向风变弱。

纬向风能够显著影响罗斯贝波的传播速度和振幅, 由波速公式

$$C = \bar{u} - \beta \left(\frac{L}{2\pi} \right)^2 \quad (1)$$

(其中, \bar{u} 为纬向风风速; $\beta = \partial f / \partial y$, f 为科里奥利力参数, y 为局地直角坐标系正北方向, β 值在中高纬地区较小, 在波幅的纬度范围内视为常数; L 为波长)可知(朱乾根等, 2007), 当纬向西风变弱时, 大尺度罗斯贝波向东传播的速度变慢, 同时纬向西风变弱通常伴随着波振幅增强, 槽的加深和脊的伸长(Palmén and Newton, 1969), 这种环流形势有利于中高纬环流的经向气压梯度加大, 高纬度地区的冷空气更容易向南输送, 导致更多极端天气气候事件发生(Francis and Vavrus, 2012)。众所周知, 1000~500 hPa 平均大气层厚度为低纬厚、高纬薄。将 1000~500 hPa 厚度对气温指数的年际变化分量进行回归分析, 结果表明(图 8c): 当气温指数升高时, 贝加尔湖以北地区均为 1000~500 hPa 厚度正异常, 正值中心位于巴伦支海、喀拉海附近, 而在贝加尔湖以南的欧亚大陆为厚度负异常, 这种“北正南负”的厚度变化形势使北半球中高纬之间厚度经向梯度减小, 导致欧亚大陆中纬度地区纬向西风变弱。如图 8d 所示, 当气温指数升高时, 欧亚大陆中东部 500 hPa 纬向风从副热带到北极地区表现为“正—负—正”的变化形势, 即从日本南部—中国江淮流域是一条“东北—西南”走向的正异常风速带, 而在 45°N~65°N 的欧亚大陆是

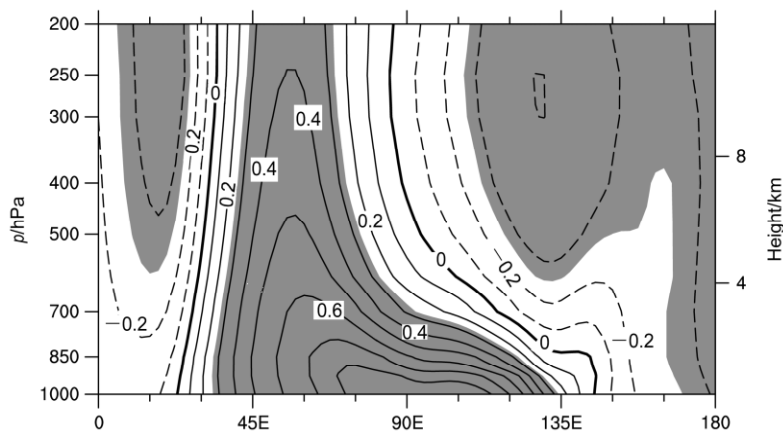


图 9 1956~2015 年冬季西伯利亚高压指数年际变化分量与位势高度的相关系数垂直分布(沿 40°N~60°N 平均, 阴影表示通过了 0.05 的显著性检验)

Fig. 9 The longitude–height cross section of correlation coefficients between interannual component of Siberian high index and geopotential height averaged over 40°–60°N in the winter during 1956–2015 (the shadings exceed the 95% confidence level)

“东—西”走向的负异常风速带, 北极关键区同样为正异常风速带。欧亚大陆中纬度减弱的西风有利于冷空气从高纬度向南侵袭, 从而导致中国东部出现温度负异常。为了证明中纬度纬向西风减弱与乌拉尔山阻塞高压和东亚大槽的联系, 定义了纬向风指数: 欧亚大陆中纬度 500 hPa 纬向风显著减弱区域 ($45^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E}\sim 135^{\circ}\text{E}$) 500 hPa 纬向风的平均, 并将其对 500 hPa 位势高度场进行回归分析, 发现当欧亚大陆中纬度纬向西风减弱时, 从巴伦支海、喀拉海到贝加尔湖地区, 位势高度变高, 而贝加尔湖以南的东亚地区, 位势高度降低 (图略), 即乌拉尔山阻塞高压脊和东亚大槽均增强。即当气温指数升高时, “北正南负”的厚度异常形势使得北半球中高纬厚度经向梯度减小, 减小的厚度经向梯度使欧亚大陆中纬度地区纬向西风变弱, 变弱的纬向西风有利于欧亚大陆阻塞高压发展和东亚大槽加深, 这些都会使欧亚大陆中高纬环流的经向气压梯度增大, 导致冷空气向南输送, 使中国东部偏冷。当气温指数降低时, 情况相反。

6 结论与讨论

本文利用 NCEP/NCAR 再分析资料和国家气象信息中心整编的 425 站月平均气温资料初步探讨了冬季北极近地面温度和西伯利亚高压的变化特征, 以及两者与中国东部气温在年际尺度上直接和间接的联系, 并讨论了其中可能存在的物理机制, 得到了以下主要结论:

(1) 冬季巴伦支海、喀拉海 (关键区) 近地面温度与中国东部气温在年际尺度上呈现显著的负相关关系, 体现了北极与中国东部气温的直接联系。其中 12 月和 2 月中国东部大部分地区气温分别与 11 月和 1 月气温指数存在显著的负相关关系, 即 11 月和 1 月关键区近地面温度可以分别作为 12 月和 2 月中国东部气温一个重要的预报因子。

(2) 对比气温指数的原始序列及其年际变化分量与中国冬季气温的关联发现: 强势的冬季北极增暖倾向会促使中国大部分地区也呈现变暖趋势, 但就冬季北极近地面温度年际变化分量而言, 其主要导致冬季中国呈现变冷的形势。换言之, 当冬季北极增暖的气候趋势大于年际变化分量的影响时, 中国主要出现暖冬; 而当冬季北极年际变化分量的影响大于其增暖趋势的影响时, 中国则主要出现冷

冬。

(3) 西伯利亚高压的 3 个指数表现为 1 月最强、最大和最偏东, 12 月、2 月次之, 11 月最弱、最小和最偏西。西伯利亚高压作为连接北极和东亚气候的桥梁, 在年际尺度上, 其 3 个指数与北极和高纬度地区近地面温度存在较为明显的正相关, 而与中国东部气温负相关关系显著, 即当北极和高纬度地区近地面温度升高 (降低) 时, 西伯利亚高压中心强度增强 (减弱), 面积扩大 (缩小), 东边界东伸 (西退), 而中国东部气温降低 (升高)。这体现了北极近地面温度 (西伯利亚高压) 和中国东部气温的间接 (直接) 联系。

(4) 当气温指数升高时, 乌拉尔山、贝加尔湖和鄂霍茨克海阻塞高压容易增强, 同时使西伯利亚高压中心强度增强, 面积扩大, 东边界东伸, 进一步导致中国东部气温降低。同时, “北正南负”的厚度异常形势使北半球中高纬厚度经向梯度减小, 减小的厚度经向梯度导致欧亚大陆中纬度地区纬向西风变弱, 减弱的纬向西风使东亚大槽和东亚阻塞高压增强, 即欧亚大陆中高纬环流的经向气压梯度增大, 便于冷空气向南输送, 导致中国东部偏冷。当气温指数降低时, 情况相反。

以往很多研究指出冬季东亚地区冷事件与北极气候异常存在紧密的联系, 比如武炳义等 (1999) 指出, 冬季巴伦支海、喀拉海是影响东亚及北半球气候变化的关键区之一, 当该区域海冰面积减小时, 亚洲大陆冷高压增强, 北太平洋海域海平面气压增高, 最终导致东亚冬季风增强。这与本文所定义的关键区基本一致, 但不同的是本文以近地面温度定义指数, 使用近地面温度定义指数并研究其与中国东部气温的关系更能直接地体现北极增暖与东亚地区冷事件的关联。Chen et al. (2014) 认为, 在年际尺度上秋季北极海冰与东亚冬季风北方模态具有紧密的联系, 即当西 (东) 半球北极海冰增多 (减少) 时, 欧亚大陆中高纬度地区降温, 表明秋季北极海冰可以作为东亚冬季风北方模态的一个预报因子。本文第 3 部分指出, 11 月和 1 月关键区近地面温度与次月中国东部气温存在很显著的负相关关系。因此除了北极海冰之外, 北极关键区近地面温度也可以作为中国东部气温变化一个重要的预报因子, 这对于进一步认识我国冬季气温变异及其成因有一定的参考价值, 为提高我国冬季气温的预测水平提供了新的思路。

西伯利亚高压作为联系北极和东亚气候的桥梁,其对东亚地区冬季气温也存在极为重要的影响。侯亚红等(2007)客观地定义了表征西伯利亚高压位置和强度的4个指数,也探讨了它们与中国冬季气温的关系。在定义指数的过程中,本文与其定义的方法有明显的不同,比如:其将冬季(12月至次年2月的平均)作为整体进行研究,且在定义面积和强度指数过程中以1023 hPa为阈值,结果显示面积和强度指数与中国冬季气温均存在显著的相关关系。以1023 hPa线内所有格点的经度值求加权平均作为表征位置的经度指数,该指数关注西伯利亚高压整体的纬向移动,结果表明经度的异常变化与中国冬季气温的变化关系不大。而本文将11月至次年2月分别进行研究,防止了由于过度时间平均对变量进行的平滑导致有些变化关系变得不显著。在定义强度和面积指数时,以1028 hPa作为阈值,中心强度和面积指数与同期中国东部气温均存在较为显著的负相关关系,与以前的研究结果类似(王遵娅和丁一汇,2006;侯亚红等,2007;刘晴晴等,2011)。定义西伯利亚高压东边界指数时关注了1028 hPa等值线最东的经度值,该指数可以表征西伯利亚高压东边界的东伸或西退,且与中国东部(高纬度和北极)气温存在较为显著的负(正)相关关系。本部分结合西伯利亚高压强度和东边界的位置,更有利于准确地把握西伯利亚高压与中国冬季温度变化的关系,可以避免当西伯利亚高压比较强,但东边界位置比较偏西带来的与只用西伯利亚高压强度统计意义不相符的情况。

在讨论北极近地面温度影响中国东部气温的物理机制时发现,北极变暖不仅通过西伯利亚高压,也可以通过对流层厚度的增加,然后引起欧亚阻高和东亚大槽增强,从而影响中国东部气候。近年来的研究也表明北极海—冰—气耦合系统与冬季东亚极端天气气候联系的方式、过程和机理还没有统一的定论,尚存在不同的观点,因此今后的研究需要扩展思路,进一步从急流、阻高和东亚大槽等方面深入研究北极对东亚的影响。

参考文献 (References)

陈洪滨, 范学花. 2012. 2011 年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾 [J]. 气候与环境研究, 17 (3): 365-380. Chen Hongbin, Fan Xuehua. 2012. Some extreme events of weather, climate, and related phenomena in 2011 [J]. Climatic and Environmental Research (in

Chinese), 17 (3): 365-380, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12070.
陈文, 康丽华. 2006. 北极涛动与东亚冬季气候在年际尺度上的联系: 准定长行星波的作用 [J]. 大气科学, 30 (5): 863-870. Chen Wen, Kang Lihua. 2006. Linkage between the arctic oscillation and winter climate over East Asia on the interannual timescale: Roles of quasi-stationary planetary waves [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 863-870, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.15.
陈文, 兰晓青, 王林, 等. 2013. ENSO 和北极涛动对东亚冬季气候异常的综合影响 [J]. 科学通报, 58 (8): 634-641. Chen Wen, Lan Xiaoqing, Wang Lin, et al. 2013. The combined effects of the ENSO and the Arctic Oscillation on the winter climate anomalies in East Asia [J]. Chinese Science Bullets, 58 (12): 1355-1362, doi:10.1007/s11434-012-5654-5.
Chen Z, Wu R G, Chen W. 2014. Impacts of autumn Arctic Sea Ice concentration changes on the East Asian winter monsoon variability [J]. J. Climate, 27 (14): 5433-5450, doi:10.1175/JCLI-D-13-00731.1.
Cohen J, Screen J A, Furtado J C, et al. 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather [J]. Nature Geoscience, 7 (9): 627-637, doi:10.1038/ngeo2234.
Deser C, Tomas R, Alexander M, et al. 2010. The seasonal atmospheric response to projected Arctic Sea Ice loss in the late twenty-first century [J]. J. Climate, 23 (2): 333-351, doi:10.1175/2009JCLI3053.1.
Ding Y H, Krishnamurti T N. 1987. Heat budget of the Siberian High and the winter monsoon [J]. Mon. Wea. Rev., 115 (10): 2428-2449, doi:10.1175/1520-0493(1987)115<2428:HBOTSH>2.0.CO;2.
Ding Y H. 1990. Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian High and its relations to cold surge in East Asia [J]. Meteor. Atmos. Phys., 44 (1-4): 281-292, doi:10.1007/BF01026822.
丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系 [J]. 气象学报, 66 (5): 808-825. Ding Yihui, Wang Zunya, Song Yafang, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 808-825, doi:10.11676/qxb2008.074.
Francis J A, Chan W H, Leathers D J, et al. 2009. Winter Northern Hemisphere weather patterns remember summer Arctic sea-ice extent [J]. Geophys. Res. Letts., 36 (7): L07503, doi:10.1029/2009GL037274.
Francis J A, Vavrus S J. 2012. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes [J]. Geophys. Res. Lett., 39 (6): L06801, doi:10.1029/2012GL051000.
高清清, 孙照渤, 倪东鸿. 2011. 冬季北极海冰与中国同期气温的关系 [J]. 气象与减灾研究, 34 (4): 7-15. Gao Qingqing, Sun Zhaobo, Ni Dongpeng. 2011. Relation of winter arctic sea-ice and the synchronous air temperature in China [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 34 (4): 7-15, doi:10.3969/j.issn.1007-9033.2011.04.002.
Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation [J]. Geophys. Res. Lett., 28 (10): 2073-2076, doi:10.1029/2000GL012311.
龚道溢, 朱锦红, 王邵武. 2002. 西伯利亚高压对亚洲大陆的气候影响分析 [J]. 高原气象, 21 (1): 8-14. Gong Daoyi, Zhu Jinhong, Wang Shaowu. 2002. The influence of Siberian high on large-scale climate over Continental Asia [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (1): 8-14, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.01.002.

- 韩哲, 李双林. 2013. 北极海冰对2008年1月乌拉尔高压异常的影响 [J]. 气候与环境研究, 18 (5): 671–680. Han Zhe, Li Shuanglin. 2013. Impact of Arctic sea ice on the high pressure over the Ural Mountains during January 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (5): 671–680, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12038.
- 何金海, 武丰民, 祁莉. 2015. 秋季北极海冰与欧亚冬季气温在年代际和年际尺度上的不同联系 [J]. 地球物理学报, 58 (4): 1089–1102. He Jinhai, Wu Fengmin, Qi Li. 2015. Decadal/interannual linking between autumn Arctic sea ice and following winter Eurasian air temperature [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 58 (4): 1089–1102, doi:10.6038/cjg20150401.
- Honda M, Yamazaki K, Nakamura H, et al. 1999. Dynamic and thermodynamic characteristics of atmospheric response to anomalous sea-ice extent in the Sea of Okhotsk [J]. J. Climate, 12 (12): 3347–3358, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<3347:DATCOA>2.0.CO;2.
- Honda M, Inoue J, Yamane S. 2009. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters [J]. Geophys. Res. Lett., 36 (8): L08707, doi:10.1029/2008GL037079.
- 侯亚红, 杨修群, 李刚. 2007. 冬季西伯利亚高压变化特征及其与中国气温的关系 [J]. 气象科技, 35 (5): 646–650. Hou Yahong, Yang Xiuqun, Li Gang. 2007. Variation features of Siberian high and relation with winter temperature in China [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 35 (5): 646–650, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2007.05.007.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R E, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–472, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Kug J S, Jeong J H, Jang Y S, et al. 2015. Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia [J]. Nature Geoscience, 8 (10): 759–762, doi:10.1038/ngeo2517.
- Li F, Wang H J. 2013. Spring surface cooling trend along the East Asian coast after the late 1990s [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (31): 3847–3851, doi:10.1007/s11434-013-5853-8.
- Li J P, Wu Z W. 2012. Importance of autumn Arctic Sea ice to northern winter snowfall [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109 (28): E1898, doi:10.1073/pnas.1205075109.
- Li Y F, Leung L R. 2013. Potential impacts of the Arctic on interannual and interdecadal summer precipitation over China [J]. J. Climate, 26 (3): 899–917, doi:10.1175/JCLI-D-12-00075.1.
- 梁苏洁, 丁一汇, 赵南, 等. 2014. 近 50 年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究 [J]. 大气科学, 38 (5): 974–992. Liang Sujie, Ding Yihui, Zhao Nan, et al. 2014. Analysis of the interdecadal changes of the wintertime surface air temperature over mainland China and regional atmospheric circulation characteristics during 1960–2013 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 38 (5): 974–992, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13234.
- 刘晴晴, 王盘兴, 徐祥德, 等. 2011. 蒙古高压一组环流指数及与中国同期气候异常关系分析 [J]. 热带气象学报, 27 (6): 889–898. Liu Qingqing, Wang Panxing, Xu Xiangde, et al. 2011. A group of circulation indices of Mongolia high and analysis of its relationship with simultaneous anomaly in the climate of China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 27 (6): 889–898, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.06.012.
- 马晓青, 丁一汇, 徐海明, 等. 2008. 2004/2005 年冬季强寒潮事件与大气低频波动关系的研究 [J]. 大气科学, 32 (2): 380–394. Ma Xiaqing, Ding Yihui, Xu Haiming, et al. 2008. The relation between Strong Cold waves and Low-Frequency Waves during the winter of 2004/2005 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 380–394, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.16.
- Palmén E, Newton C W. 1969. Atmospheric Circulation Systems [M]. New York: Academic Press, 90–91.
- Screen J A, Simmonds I. 2010. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification [J]. Nature, 464 (7293): 1334–1337, doi:10.1038/nature09051.
- 司东, 李清泉, 柳艳菊, 等. 2014. 2013/2014 年东亚冬季风异常偏弱的可能成因 [J]. 气象, 40 (7): 891–897. Si Dong, Li Qingquan, Liu Yanju, et al. 2014. Possible causes for the anomalous weak East Asian winter monsoon in 2013/2014 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 40 (7): 891–897, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.07.014.
- 司东, 马丽娟, 王朋岭, 等. 2016. 2015/2016 年冬季北极涛动异常活动及其对我国气温的影响 [J]. 气象, 42 (7): 892–897. Si Dong, Ma Lijuan, Wang Pengling, et al. 2016. Anomalous activity of arctic oscillation in winter 2015/2016 and its impact on temperature in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42 (7): 892–897, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.07.013.
- 孙晓娟, 王盘兴, 智海, 等. 2010. 蒙古高压若干环流指数及与我国冬季气温异常相关的分析和比较 [J]. 高原气象, 29 (6): 1493–1500. Sun Xiaojuan, Wang Panxing, Zhi Hai, et al. 2010. Analysis and comparison of several Mongolian high circulation indices and their relationship with temperature anomaly of China in winter [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (6): 1493–1500.
- Tang Q H, Zhang X J, Yang X H, et al. 2013. Cold winter extremes in northern continents linked to Arctic sea ice loss [J]. Environmental Research Letters, 8 (1): 014036, doi:10.1088/1748-9326/8/1/014036.
- Wang L, Chen W, Zhou W, et al. 2010. Effect of the climate shift around mid1970s on the relationship between wintertime Ural blocking circulation and East Asian climate [J]. International Journal of Climatology, 30 (1): 153–158, doi:10.1002/joc.1876.
- 王遵娅, 丁一汇. 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因 [J]. 大气科学, 30 (6): 1068–1076. Wang Zunya, Ding Yihui. 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1068–1076, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.02.
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 1–296. Wei Fengying. 1999. Modern Climatic Statistics Diagnosis and Forecast Technique (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–296.
- 武炳义, 黄荣辉, 高登义. 1999. 冬季北极喀拉海、巴伦支海海冰面积变化对东亚冬季风的影响 [J]. 大气科学, 23 (3): 267–275. Wu Bingyi, Huang Ronghui, Gao Dengyi. 1999. The impact of variation of sea-ice extent in the Kara Sea and the Barents Seas in winter on the winter monsoon over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (3): 267–275, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.03.02.
- Wu B Y, Wang J. 2002. Winter arctic oscillation, Siberian High and East

- Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (19): 1897, doi:10.1029/2002GL015373.
- Wu B Y, Zhang R H, D'Arrigo R. 2006. Distinct modes of the East Asian winter monsoon [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (8): 2165–2179, doi:10.1175/MWR3150.1.
- Wu Z W, Li J P, Jiang Z H, et al. 2011. Predictable climate dynamics of abnormal East Asian winter monsoon: Once-in-a century snowstorms in 2007/2008 winter [J]. *Climate Dyn.*, 37 (7–8): 1661–1669, doi:10.1007/s00382-010-0938-4.
- Wu Z W, Li X X, Li Y J, et al. 2016. Potential influence of Arctic sea ice to the interannual variations of East Asian spring precipitation [J]. *J. Climate*, 29 (8): 2797–2813, doi:10.1175/JCLI-D-15-0128.1.
- 解小寒, 杨修群. 2006. 冬季北极海冰面积异常与中国气温变化之间的年际关系 [J]. *南京大学学报 (自然科学)*, 42 (6): 549–561. Xie Xiaohan, Yang Xiuqun. 2006. Interannual relationship between Arctic Sea ice concentration anomaly and China air temperature variation during winter [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 42 (6): 549–561, doi:10.3321/j.issn:0469-5097.2006.06.001.
- 赵进平, 史久新, 王召民, 等. 2015. 北极海冰减退引起的北极放大机理与全球气候效应 [J]. *地球科学进展*, 30 (9): 985–995. Zhao Jinping, Shi Jiuxin, Wang Zhaomin, et al. 2015. Arctic amplification produced by sea ice retreat and its global climate effects [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 30 (9): 985–995, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2015.09.0985.
- Zhou B Z, Gu L H, Ding Y H, et al. 2011. The great 2008 Chinese ice storm: Its socioeconomic-ecological impact and sustainability lessons learned [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92 (1): 47–60, doi:10.1175/2010BAMS2857.1.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. 天气学原理和方法 (4 版) [M]. 北京: 气象出版社, 49–181. Zhu Qianguan, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. *The Principle and Method of Synoptic Meteorology (4th ed.) (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 49–181.