

支蓉,高辉,2019. 2018/2019年冬季北半球大气环流特征及对我国冬季气温异常的影响[J]. 气象,45(7):1019-1027. Zhi R, Gao H, 2019. Northern Hemisphere atmospheric circulation characteristics in winter 2018/2019 and its impact on temperature anomalies in China[J]. Meteor Mon, 45(7):1019-1027(in Chinese).

2018/2019年冬季北半球大气环流特征及 对我国冬季气温异常的影响^{*}

支 蓉 高 辉

国家气候中心,中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081

提 要: 2018/2019年冬季,东亚冬季风较常年同期偏强,西伯利亚高压偏强。在北半球500 hPa高度距平场上,乌拉尔山地区为高度场正异常,贝加尔湖-巴尔喀什湖地区为高度场负异常,欧亚中高纬整体以经向型环流为主。冬季冷空气活动较频繁且强度偏强,受其影响,除东北地区、西南地区及华南地区中东部等地气温较常年同期偏高外,全国其余地区气温偏低。此外,欧亚中高纬环流季节内调整明显,导致我国气温异常表现出明显的阶段性特征。前期秋季巴伦支海-喀拉海海冰密集度偏低是造成东亚冬季风偏强的重要原因。

关键词: 东亚冬季风,西伯利亚高压,中高纬环流,巴伦支海-喀拉海海冰

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.07.012

Northern Hemisphere Atmospheric Circulation Characteristics in Winter 2018/2019 and Its Impact on Temperature Anomalies in China

ZHI Rong GAO Hui

Laboratory of Climate Studies, National Climate Centre, CMA, Beijing 100081

Abstract: The East Asian winter monsoon and the Siberian high were both stronger than normal during the 2018/2019 winter. For geopotential height anomalies at 500 hPa in Northern Hemisphere, the Ural Mountain Area was positive anomaly, and Baikal Lake-Barkash Lake Area was negative anomaly. The mid-high latitudes of Eurasia were mainly dominated by meridional circulation. In winter 2018/2019, the cold air processes occurred frequently and the intensity was strong. The temperature in the northeastern, south-western and central and eastern parts of South China were higher than normal, but the other parts were on the low side due to the influence of the cold air processes. In addition, the intraseasonal variation of circulation of the mid-high latitudes of Eurasia was significant, which leads to the periodic characteristics of temperature anomaly in China. The lower concentration of sea ice in the Barents Sea and Kara Sea in the early autumn is the main reason for the strong East Asian winter monsoon.

Key words: East Asian winter monsoon, Siberian high, circulation of the mid-high latitudes, sea ice in the Barents Sea and Kara Sea

^{*} 国家自然科学基金面上项目(41575074)和国家重点研发计划(2018YFC1505600)共同资助

2019年4月15日收稿; 2019年7月2日收修定稿

第一作者:支蓉,主要从事短期气候预测研究. Email: zhirong@cma.gov.cn

通信作者:高辉,主要从事短期气候预测研究. Email: gaohui@cma.gov.cn

引 言

东亚冬季风是东亚气候系统的重要组成部分,对中国以及整个东亚地区冬季的天气和气候异常都有重要影响。东亚冬季风来自亚洲大陆腹地的西伯利亚,冷空气从西北、北及西三个方向到达中西伯利亚,从那里主要由西北及西两个方向袭击中国,因此,冬季风的强度完全由中心在西伯利亚的反气旋强度决定(丁一汇,2013)。大量研究表明,东亚冬季风偏强时,对流层低层西伯利亚高压和阿留申低压偏强,中层东亚大槽偏深,为极地冷空气南下影响我国创造了有利条件,我国除东北北部和西南以外的大部分地区气温偏低,反之亦然(郭其蕴,1994; Zhang et al, 1997; Huang et al, 2007; 高辉, 2007; 陈文等, 2013)。

由于受多种因子的影响,东亚冬季风表现出多时间尺度的变化特点。首先,东亚冬季风具有明显的季节内变化特征,主要周期突出表现为 30~60 d (或准 40 d) 以及 10~20 d (准双周)(李崇银, 1988; Chan and Li, 2004)。其次,东亚冬季风存在显著的年际变化,具有明显的准 2 a、准 4 a 和 4~7 a (或 5~8 a) 周期 (Chen et al, 2000; 黄荣辉等, 2007; Huang et al, 2012); 在年际尺度上影响东亚冬季风的主要外强迫信号包括 ENSO、北极海冰、热带印度洋海温及黑潮区海温异常等 (Li, 1990; Zhang et al, 1996; 朱伟军和孙照渤, 2000; 谭言科等, 2004; Wu et al, 2011; 2015)。第三,东亚冬季风表现出明显的年代际变化特征,虽然由不同定义或指数分析得到的年代际周期不完全一致,但大多数冬季风指数均显示 20 世纪 80 年代中期以来明显的年代际减弱特征 (Wang et al, 2010; 贺圣平和王会军, 2012; 贺圣平, 2013; 王会军和范可, 2013); 北极涛动的显著增强可能是造成东亚冬季风年代际偏弱的重要原因 (贺圣平和王会军, 2012); 此外,北太平洋海温年代际振荡也可能对 ENSO 与东亚冬季风的相关关系产生影响 (Wang et al, 2008; Ding et al, 2010); 李维京等 (2013) 的研究则进一步揭示了海温、北极海冰等关键影响因子与我国冬季气温关系的年代际变化,并指出需要针对冷期和暖期中不同影响因子对冬季气温的作用,分时段建立多因子回归预测模型。

近年来,国家气候中心在每年冬季结束后及时开展当年冬季北半球大气环流特征的分析,并诊断其对我国天气气候的影响(丁婷等, 2017; 章大全和宋文玲, 2018)。2018/2019 年冬季,东亚冬季风整体偏强,西伯利亚高压偏强,但全国平均气温较常年同期偏高 0.3℃。从我国气温距平空间分布来看,呈现西南—东北向“十—十”的异常分布,除西南地区、东北地区及华南地区中东部等地气温较常年同期偏高外,全国其余地区气温偏低。此外,欧亚中高纬环流在季节内调整明显,相应地,全国平均气温也呈现出明显的阶段性变化特征。2018/2019 年冬季,全国平均降水量 55.8 mm,较常年同期 (41.0 mm) 偏多 36.1%,降水“南多北少”的分布格局明显。本文重点针对冬季气温异常的空间分布和阶段性变化特征开展分析,并揭示其与东亚冬季风之间的联系。

1 资料和方法

本文使用的资料主要有:国家气象信息中心整编的“中国地面基本气象要素日值数据集(V3.0)”逐日气温和降水观测资料,包含了中国 2474 个基本、基准和一般气象站 1951 年 1 月以来气温、降水的日值数据,并在逐日数据的基础上计算得到逐月和季节平均数据。文中冬季指第一年 12 月至第二年 2 月的三个月平均,如 2018/2019 年冬季为 2018 年 12 月至 2019 年 2 月。前冬、隆冬和后冬分别指 12、1 和 2 月。大气环流资料为 NCEP/NCAR 逐日再分析资料 (Kalnay et al, 1996),水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。海温观测资料为 NOAA 提供的全球逐月海温数据 (Reynolds et al, 2007),水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。北极海冰资料为英国 Hadley 中心提供的北极海冰密集度数据 (Rayner et al, 2003)。如无特别说明,文中所指气候态均为 1981—2010 年平均。

东亚冬季风强度指数采用的是朱艳峰 (2008) 的定义,即将 $25^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$ 、 $80^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$ 范围内 500 hPa 纬向风的平均值减去 $50^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$ 、 $80^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$ 范围内 500 hPa 纬向风的平均值,并对结果进行标准化处理。西伯利亚高压指数定义为 $40^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$ 、 $80^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$ 范围内海平面气压的面积加权平均值,结果同样进行标准化处理。

2 2018/2019 年冬季我国气温异常特征

2018/2019 年冬季,全国平均气温为 -3.1°C ,接近常年同期(-3.4°C)(图 1a)。从气温距平的空间分布来看,整体呈现西南—东北向“十一十”的异常分布。气温偏低的区域主要集中在西北地区西部、内蒙古西部、黄淮西部、江淮西部、江汉、江南西部及华南西部等地,其中新疆东部、兰州西部、内蒙古西部及江南西部等地气温较常年同期偏低 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$,局部偏低 2°C 以上;全国其余大部分地区气温接近常年同期至偏高,其中内蒙古东部、东北大部、西南地区南部、华南中东部等地气温较常年同期偏高 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$,局部偏高 2°C 以上(图 1b)。

根据国家气候中心监测(王遵娅等,2017),2018/2019 年冬季共有 10 次冷空气过程影响我国(表 1),接近常年同期(10.7 次)。其中 12 和 2 月的冷空气过程均表现出强度偏强的特点,尤其是 12 月 27—30 日的全国型冷空气,持续时间长、影响范围大、低温极端性强、雨雪冰冻过程明显。观测显示,该次过程华北北部、东北南部、江淮、江南、华南等地

表 1 2018/2019 年冬季冷空气过程

Table 1 Cold air processes in winter 2018/2019		
开始日期/ 年-月-日	结束日期/ 年-月-日	冷空气类型
2018-12-03	2018-12-06	强冷空气过程
2018-12-23	2018-12-24	强冷空气过程
2018-12-27	2018-12-30	全国型一般冷空气过程
2019-1-15	2019-1-17	一般冷空气过程
2019-1-20	2019-1-22	一般冷空气过程
2019-1-26	2019-1-27	一般冷空气过程
2019-1-31	2019-2-01	强冷空气过程
2019-2-04	2019-2-05	强冷空气过程
2019-2-07	2019-2-11	强冷空气过程
2019-2-15	2019-2-16	强冷空气过程

降温 10°C 以上,华南、华中等地降温超 12°C ;该次冷空气过程还造成南方大部地区及甘肃东南部、陕西南部、河南等地出现雨雪天气,其中湖南中北部、湖北南部、江西北部 and 贵州等地出现暴雪(徐冉等,2019)。

2018/2019 年冬季,除东北地区、西南地区及华南中东部等地整个冬季表现为持续异常偏暖特征外,全国其余大部分地区气温季节内波动明显。2018 年 12 月,全国平均气温为 -3.8°C ,较常年同期(-3.2°C)明显偏低;除东北及内蒙古东部局部气温较常年同期偏高外,我国 35°N 以北的区域气温均较常年同期显著偏低,其中新疆大部、甘肃西部及内蒙古西部等地气温偏低 2°C 以上,局部偏低达 4°C 以上(图 2a);新疆、甘肃及内蒙古平均气温偏低的程度位列 1981 年以来历史第五位;结合图 2d 可以看出,2018 年 12 月中有 19 d 全国平均气温较常年同期偏低,其中 9 d 偏低 3°C 以上,最大偏低幅度达 4.55°C 。2019 年 1 月,气温回暖明显,全国整体以一致偏暖为主要特征;全国平均气温为 -4.1°C ,较常年同期(-5.0°C)偏高 0.9°C ;东北中部和北部以及内蒙古东部部分地区气温偏高 4°C 以上,局部偏高 6°C 以上(图 2b);黑龙江、吉林及辽宁平均气温偏高的程度位列 1961 年以来历史第二位;结合图 2d 可以看出,2019 年 1 月仅有 2 d 全国平均气温较常年同期偏低 1°C 以上,其余时段全国平均气温接近常年同期或偏高。2019 年 2 月,全国平均气温为 -1.3°C ,接近常年同期(-1.7°C)。从气温异常的空间分布来看,其总体特征与 2018 年 12 月相似,但我国北方地区偏冷的空间范围和程度较 2018 年 12 月明显减弱,而南方地区的偏冷程度则略有增强(图 2c);结合图 2d,2019 年 2 月,全国平均气温较

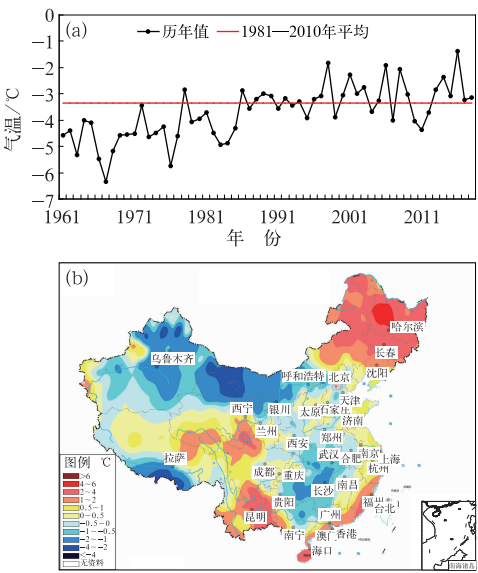


图 1 1961/1962—2018/2019 年冬季全国平均气温历年变化(a)及 2018/2019 年冬季全国气温距平分布(b)

Fig. 1 Time series of winter mean temperature over China during 1961/1962—2018/2019 (a) and the distribution of temperature anomalies in winter 2018/2019 (b)

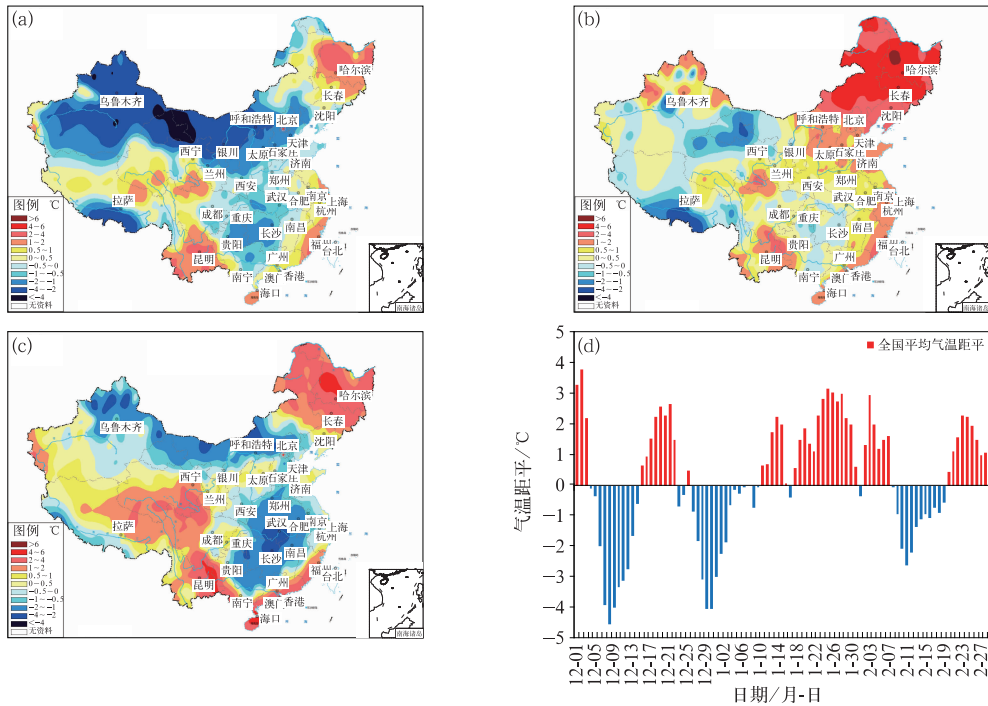


图 2 2018 年 12 月(a)、2019 年 1 月(b)和 2 月(c)全国气温距平分布及 2018/2019 年冬季逐日全国平均气温距平(d)

Fig. 2 Distribution of temperature anomalies of China in December 2018 (a), January 2019 (b), February 2019 (c) and daily mean temperature anomalies over China in winter 2018/2019 (d)

常年同期偏低的天数为 12 d, 少于 2018 年 12 月, 且最大偏低幅度仅为 2.63°C, 仅有 3 d 偏低达 2°C 以上, 整体偏低程度明显弱于 2018 年 12 月。总体而言, 2018/2019 年冬季全国平均气温整体表现出“前冬冷、隆冬暖、后冬接近常年”的阶段变化特征。

3 2018/2019 年冬季北半球大尺度环流及东亚冬季风活动特征

3.1 北半球大尺度环流背景

2018/2019 年冬季, 北半球 500 hPa 高度场三波型特征明显, 大槽分别位于太平洋、北美和欧洲(图 3)。乌拉尔山地区为高度场正异常, 贝加尔湖-巴尔喀什湖地区为高度场负异常, 东亚槽强度接近常年, 欧亚中高纬以经向型环流特征为主, 有利于高纬地区的冷空气沿西路和中路南下影响我国; 高原高度场略偏高; 西太平洋副热带高压(下文简称西太副高)异常偏强、西伸、脊线偏北; 印缅槽偏弱。

从冬季季节内逐月环流演变来看, 副热带地区环流特征季节内变化不大, 西太副高持续偏强、西

伸、偏北, 印缅槽持续偏弱; 而欧亚中高纬地区环流季节内调整则比较明显。2018 年 12 月, 乌拉尔山

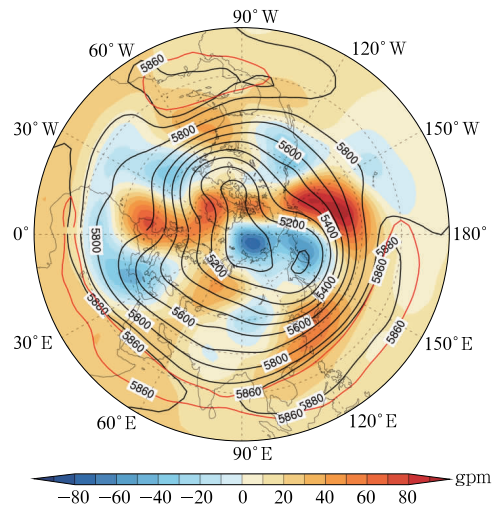


图 3 2018/2019 年冬季平均 500 hPa 高度场(等值线)和距平(阴影)(红色等值线表示气候平均 5860 gpm)

Fig. 3 The 500 hPa geopotential height (contours) and anomalies (shading) in winter 2018/2019 (Red contours stand for the position of climatology of 5860 gpm geopotential height)

地区 500 hPa 高度场为显著正异常,贝加尔湖-巴尔喀什湖地区为高度场负异常,环流经向度较大,有利于高纬地区的冷空气从西路和中路南下入侵我国(图 4a);从 700 hPa 风场距平图(图 4d)上可以看出,中国西部地区整体处于气旋式环流异常控制之下,主要受偏北风距平的影响,而东部地区则主要受偏南风距平影响。2019 年 1 月,中高纬环流形势发生明显调整,乌拉尔山地区高度场正异常减弱,贝加尔湖-巴尔喀什湖地区由高度场负异常转为正异常,欧亚中高纬整体调整为以平直的纬向型环流为主,冷空气活动较弱;我国整体处于高度场正距平控制之下,有利于大范围气温回升(图 4b);从 700 hPa 风场距平图(图 4e)上也可以看出,中国大部地区受偏南风距平的影响。2019 年 2 月,贝加尔湖-巴尔喀什湖地区再次转变为高度场负异常,但乌拉尔山地区高度场正异常不显著,因此欧亚中高纬地区环流经向度虽较 1 月有所加强,但弱于 2018 年 12 月;此外贝加尔湖-巴尔喀什湖以北为高度场正异常,有利于高纬地区的冷空气主要经由中路影响我国(图 4c);低层风场(图 4f)再次转变为与 2018 年 12

月较为类似的形势。正是由于乌拉尔山地区及贝加尔湖-巴尔喀什湖地区高度场异常的季节内调整,使得欧亚中高纬环流在季节内呈现“经向—纬向—经向”的阶段性变化特征,才导致 2018/2019 年冬季全国平均气温呈现出与之相匹配的“前冬冷、隆冬暖、后冬接近常年”的季节内冷暖波动。

3.2 东亚冬季风活动特征

2000 年以来,东亚冬季风整体处于偏强的年代际背景下(图 5a);西伯利亚高压的年代际特征整体也以偏强为主,且偏强的年份异常程度较为显著,偏弱的年份异常程度较弱(图 5b)。2018/2019 年冬季,东亚冬季风指数为 0.98,西伯利亚高压指数为 2.0,均较常年同期偏强,与当前的年代际背景特征相一致。

从东亚冬季风和西伯利亚高压逐候实况监测(图 6)可以看出,二者在季节内表现出较为一致的阶段性演变特征:2018 年 12 月西伯利亚高压异常偏强,同时东亚冬季风较常年同期明显偏强,这也是造成 12 月我国气温较常年同期明显偏低的重要原因。

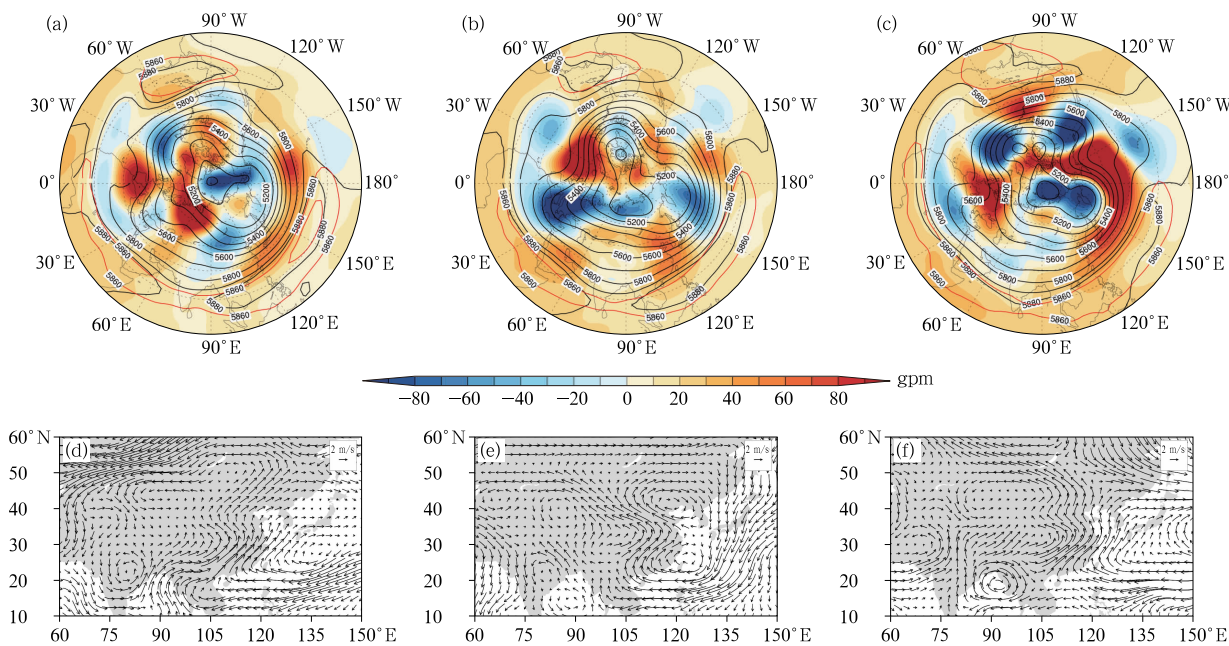


图 4 2018 年 12 月(a,d)、2019 年 1 月(b,e)及 2 月(c,f)平均 500 hPa 高度场(等值线)和距平场(阴影)(a~c),700 hPa 风场距平(d~f,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(红色等值线表示气候平均 5860 和 5880 gpm);

Fig. 4 The 500 hPa geopotential height (contours) and anomalies (shading) (a—c) in December 2018 (a, d), January (b, e) and February 2019 (c, f), 700 hPa wind anomalies (d—f, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(Red contours stand for the climatological 5860 gpm and 5880 gpm contours)

因;2019 年 1 月,西伯利亚高压强度整体接近常年,东亚冬季风较常年略偏弱,我国气温迅速回升,全国绝大部分地区一致偏暖;2019 年 2 月上半月,西伯利亚高压持续偏强,东亚冬季风也明显偏强,但下半月出现波动,二者均转为较常年略偏弱的状态,因此从 2 月月平均状况来看,全国气温虽再次下降,出现

较大范围偏冷的区域,但偏冷的异常程度弱于 2018 年 12 月。

我国冬季气温异常与西伯利亚高压和东亚冬季风关系密切(丁婷等,2017;章大全和宋文玲,2018),从西伯利亚高压与全国平均气温的逐日演变(图 7a)可以看出,二者表现出明显的反相变化特

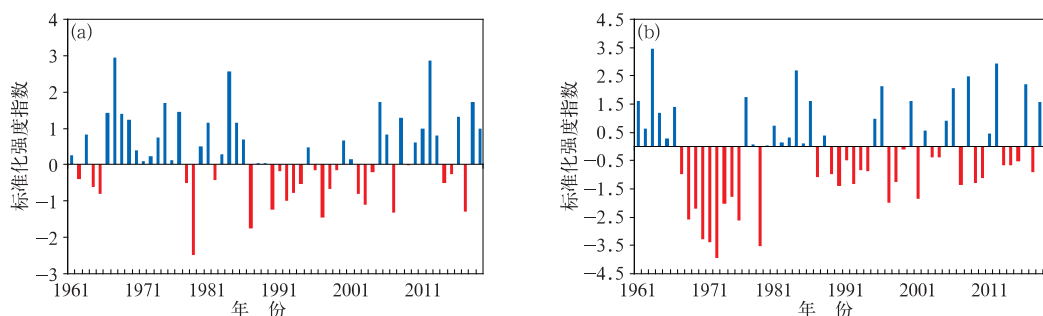


图 5 1961/1962—2018/2019 年冬季东亚冬季风(a)及西伯利亚高压(b)标准化强度指数历年变化

Fig. 5 Variation of standardized East Asia winter monsoon index (a) and Siberian high intensity index (b) in 1961/1962—2018/2019 winter

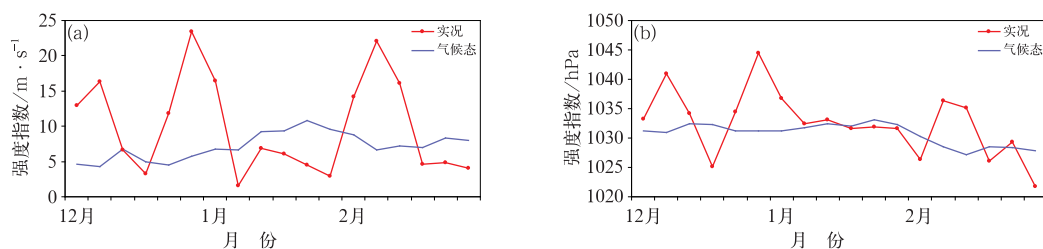


图 6 2018/2019 年冬季东亚冬季风强度指数(a)和西伯利亚高压强度指数(b)逐候演变
(蓝线:气候态)

Fig. 6 Pentad variation of East Asia winter monsoon index (a) and Siberian high intensity index (b) in 2018/2019 winter
(blue line: climatology)

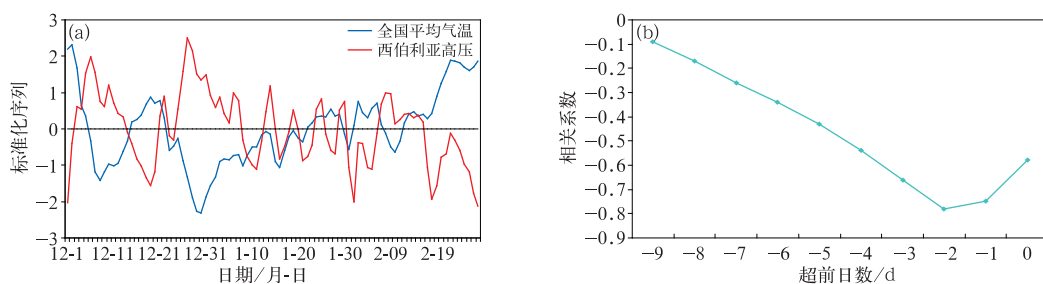


图 7 2018/2019 年冬季逐日西伯利亚高压强度指数和全国平均气温标准化序列(a)及西伯利亚高压对全国平均气温的超前相关(b)

Fig. 7 Daily variation of standardized Siberian high (SH) intensity index and temperature over China in 2018/2019 winter (a) and the leading correlation coefficients between them (b, numbers in the abscissa mean the leading days of SH)

征,西伯利亚高压显著偏强的时段与全国平均气温显著偏低的时段恰好对应,而西伯利亚高压明显偏弱的时段,全国平均气温明显偏高。冬季 90 d 逐日序列的相关系数为 -0.58 ,通过了 0.001 的显著性水平检验。进一步分析发现,西伯利亚高压对我国气温存在明显的超前影响,从逐日超前相关分析(图 7b)可知,最强的作用时间为超前 2 d,此时相关系数为 -0.78 。

3.3 东亚冬季风异常的可能原因

研究表明,冬季西伯利亚高压与秋冬季海冰密集度异常的空间演变有密切关系(Wu et al, 2011; 2015),前期北极海冰的异常会影响北极地区冬季的热力状况,并通过大气的正、负反馈作用影响中低纬大气环流;秋季巴伦支海-喀拉海海冰偏少,将导致海洋热量损失增多和对低层大气加热的增强,增加大气斜压性和不稳定性,通过负反馈机制导致高纬度地区海平面气压和高度场升高,西伯利亚高压加强,并进一步导致东亚气温偏低。区域平均的 9 月海冰密集度与冬季西伯利亚高压呈显著负相关(去掉线性趋势后,二者 1982—2018 年相关系数为 -0.43 ,通过了 0.001 的显著性水平检验),可作为冬季西伯利亚高压预测的前兆信号;2018 年 9 月巴伦支海-喀拉海($76.5^{\circ}\sim 83.5^{\circ}\text{N}$ 、 $60.5^{\circ}\sim 149.5^{\circ}\text{E}$)平均海冰密集度标准化指数为 -1.56 ,即使去掉线性趋势之后依然偏小,有利于冬季西伯利亚高压偏强(图 8)。

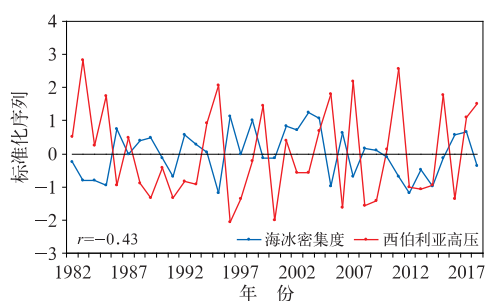


图 8 1982—2018 年 9 月巴伦支海-喀拉海平均海冰密集度标准化序列(去线性趋势)及 1982/1983—2018/2019 年冬季西伯利亚高压强度指数标准化序列(去线性趋势)

Fig. 8 Variation of standardized Arctic sea ice concentration in Barents-Kara Seas of September during 1982—2018 (detrend) and Siberian high intensity index of winter during 1982/1983—2018/2019 (detrend)

前面仅从海冰角度对 2018/2019 年东亚冬季风偏强的可能原因加以解释。需要同时指出的是,2018/2019 年冬季风偏强的成因较为复杂。我们也分析了其他外强迫信号的作用,尤其是近几年在冬季气温诊断和预测业务中重点考虑的因子。但这些因子和 2018/2019 年冬季风偏强并不能很好对应,甚至相反。例如,大量研究表明,在厄尔尼诺事件背景下东亚冬季风易偏弱,但 2018 年 9 月开始的厄尔尼诺事件并没有对欧亚中高纬度环流的纬向特征起到贡献,相反二者的对应关系在这个冬季和之前的统计结果相反。同样,已有的研究表明,2017/2018 年冬季北半球极涡持续偏弱,北大西洋海温持续偏暖,中高纬环流系统异常和海温外强迫的共同作用是东亚冬季风偏强的主要原因(章大全和宋文玲, 2018)。但从实况监测看,2017/2018 年冬季北大西洋海温一致偏暖,2018/2019 年冬季则呈现出从高纬度到热带大西洋海温距平“一十一”的分布,即正三极子型分布,整个北大西洋海温偏暖并不明显。以上分析表明,上述因子对我国气温和东亚冬季风的影响可能并非线性,还需要在今后的研究中进一步加以诊断。

4 结 论

(1) 2018/2019 年冬季,全国平均气温为 -3.1°C ,接近常年同期(-3.4°C)。从空间分布看,整体呈现西南—东北向“十一十”的异常分布。从气温季节内演变的阶段性特征来看,全国平均气温整体表现出“前冬冷、隆冬暖、后冬接近常年”的阶段性变化特征;除东北地区、西南地区及华南地区中东部等地整个冬季表现为持续异常偏暖外,全国其余大部地区气温较常年同期偏低。

(2) 从冬季季节内逐月环流演变来看,副热带地区环流特征季节内变化不大,西太副高持续偏强、西伸、偏北,印缅槽持续偏弱;而欧亚中高纬地区环流季节内调整则比较明显:2018 年 12 月,乌拉尔山地区 500 hPa 高度场为显著正异常,贝加尔湖-巴尔喀什湖地区为高度场负异常,欧亚中高纬环流经向度较大;2019 年 1 月,乌拉尔山地区高度场正异常减弱,贝加尔湖-巴尔喀什湖地区由高度场负异常转为正异常,欧亚中高纬整体调整为以平直的纬向型环流为主;2 月,贝加尔湖-巴尔喀什湖地区再次转变为高度场负异常,欧亚中高纬环流经向度再次增

强。正是由于乌拉尔山地区及贝加尔湖-巴尔喀什湖地区高度场异常的季节内调整,导致 2018/2019 年冬季中国气温表现出明显的季节内波动特征。

(3) 2000 年以来,东亚冬季风和西伯利亚高压整体均处于偏强的年代际背景下,2018/2019 年冬季东亚冬季风和西伯利亚高压均较常年同期偏强,与年代际背景相一致。且二者在季节内尺度上也表现出较为一致的阶段性演变特征。此外,西伯利亚高压与全国平均气温的季节内演变表现出明显的负相关。前期(秋季)巴伦支海-喀拉海海冰密集度偏小可能是导致东亚冬季风偏强的重要原因。

参考文献

- 陈文,魏科,王林,等,2013. 东亚冬季风气候变异和机理以及平流层过程的影响[J]. 大气科学, 37(2): 425-438. Chen W, Wei K, Wang L, et al, 2013. Climate variability and mechanisms of the East Asian winter monsoon and the impact from the stratosphere[J]. Chin J Atmos Sci, 37(2): 425-438(in Chinese).
- 丁婷,王永光,柯宗建,等,2017. 2016/2017 年冬季北半球大气环流及对我国冬季气温的影响[J]. 气象, 43(7): 887-893. Ding T, Wang Y G, Ke Z J, et al, 2017. Northern Hemisphere atmospheric circulation in winter 2016/2017 and its impact on temperature in China[J]. Meteor Mon, 43(7): 887-893(in Chinese).
- 丁一汇, 2013. 中国气候[M]. 北京: 科学出版社: 576. Ding Y H, 2013. Chinese Climate[M]. Beijing: Science Press: 576 (in Chinese).
- 高辉, 2007. 东亚冬季风指数及其对东亚大气环流异常的表征[J]. 气象学报, 65(2): 272-279. Gao H, 2007. Comparison of four East Asian winter monsoon indices[J]. Acta Meteor Sin, 65(2): 272-279(in Chinese).
- 郭其蕴, 1994. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系[J]. 应用气象学报, 5(2): 218-225. Guo Q Y, 1994. Relationship between the variations of East Asian winter monsoon and temperature anomalies in China[J]. J Appl Meteor Sci, 5(2): 218-225(in Chinese).
- 贺圣平, 2013. 20 世纪 80 年代中期以来东亚冬季风年际变率的减弱及可能成因[J]. 科学通报, 58(8): 609-616. He S P, 2013. Reduction of the East Asian winter monsoon interannual variability after the mid-1980s and possible cause[J]. Chin Sci Bull, 58(8): 609-616(in Chinese).
- 贺圣平,王会军, 2012. 东亚冬季风综合指数及其表达的东亚冬季风年代际变化特征[J]. 大气科学, 36(3): 523-538. He S P, Wang H J, 2012. An integrated East Asian winter monsoon index and its interannual variability[J]. Chin J Atmos Sci, 36(3): 523-538 (in Chinese).
- 黄荣辉,魏科,陈际龙,等,2007. 东亚 2005 年和 2006 年冬季风异常及其与准定常行星波活动关系的分析研究[J]. 大气科学, 31(6): 1033-1048. Huang R H, Wei K, Chen J L, et al, 2007. The East Asian winter monsoon anomalies in the winters of 2005 and 2006 and their relations to the quasi-stationary planetary wave activity in the Northern Hemisphere[J]. Chin J Atmos Sci, 31(6): 1033-1048(in Chinese).
- 李崇银, 1988. 频繁的强东亚大槽活动与 El Niño 的发生[J]. 中国科学(B 辑), 28(6): 667-674. Li C Y, 1988. Frequent activities of strong East Asian trough and the occurrence of El Niño[J]. Sci China (Ser B), 28(6): 667-674(in Chinese).
- 李维京,李怡,陈丽娟,等,2013. 我国冬季气温与影响因子关系的年代际变化[J]. 应用气象学报, 24(4): 385-396. Li W J, Li Y, Chen L J, et al, 2013. Inter-decadal variability of the relationship between winter temperature in China and its impact factors[J]. J Appl Meteor Sci, 24(4): 385-396(in Chinese).
- 谭言科,张人禾,何金海,等,2004. 热带印度洋海温的年际变化与 ENSO[J]. 气象学报, 62(6): 831-840. Tan Y K, Zhang R H, He J H, et al, 2004. Relationship of the interannual variations of sea surface temperature in tropical Indian Ocean to ENSO[J]. Acta Meteor Sin, 62(6): 831-840(in Chinese).
- 王会军,范可, 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征[J]. 大气科学, 37(2): 313-318. Wang H J, Fan K, 2013. Recent changes in the East Asian monsoon [J]. Chin J Atmos Sci, 37(2): 313-318(in Chinese).
- 王遵亲,司东,段丽瑶, 2017. 空气过程监测指标[M]. 北京: 气象出版社. Wang Z Y, Si D, Duan L Y, 2017. Air Process Monitoring Index[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 徐冉,张天航,饶晓琴,等,2019. 2018 年 12 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 45(3): 437-444. Xu R, Zhang T H, Rao X Q, et al, 2019. Analysis of the December 2018 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 45(3): 437-444(in Chinese).
- 章大全,宋文玲, 2018. 2017/2018 年冬季北半球大气环流特征及对我国天气气候的影响[J]. 气象, 44(7): 969-976. Zhang D Q, Song W L, 2018. Northern Hemisphere atmospheric circulation characteristics in 2017/2018 winter and its impact on weather and climate in China[J]. Meteor Mon, 44(7): 969-976(in Chinese).
- 朱伟军,孙渤潮, 2000. 冬季黑潮区域海温异常对北太平洋风暴轴的影响[J]. 应用气象学报, 11(2): 145-153. Zhu W J, Sun Z B, 2000. Impacts of Kuroshio SSTA on storm track over North Pacific in winter[J]. J Appl Meteor Sci, 11(2): 145-153 (in Chinese).
- 朱艳峰, 2008. 一个适用于描述中国大陆冬季气温变化的东亚冬季风指数[J]. 气象学报, 66(5): 781-788. Zhu Y F, 2008. An index of East Asian winter monsoon applied to description the Chinese mainland winter temperature changes[J]. Acta Meteor Sin, 66(5): 781-788(in Chinese).
- Chan J C L, Li C Y, 2004. The East Asian winter monsoon[M] // Chang C P. East Asian Monsoon. Singapore: World Scientific: 54-106.
- Chen W, Graf H F, Huang R H, 2000. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relationship to summer monsoon[J]. Adv Atmos Sci, 17(1): 48-60.
- Ding R Q, Ha K J, Li J P, 2010. Interdecadal shift in the relationship between the East Asian summer monsoon and the tropical Indian Ocean[J]. Clim Dyn, 34(7/8): 1059-1071.

- Huang R H, Chen J L, Huang G, 2007. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China[J]. *Adv Atmos Sci*, 24(6):993-1023.
- Huang R H, Chen J L, Wang L, et al, 2012. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system[J]. *Adv Atmos Sci*, 29(5):910-942.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3):437-470.
- Li C Y, 1990. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events[J]. *Adv Atmos Sci*, 7(1):36-46.
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al, 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late Nineteenth Century[J]. *J Geophys Res*, 108(D14):4407.
- Reynolds R W, Smith T M, Liu C, et al, 2007. Daily high-resolution-blended analysis for sea surface temperature[J]. *J Climate*, 20(22):5473-5496.
- Wang B, Wu Z W, Chang C P, et al, 2010. Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon: the northern and southern temperature modes[J]. *J Climate*, 23(6):1495-1512.
- Wang L, Chen W, Huang R H, 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon[J]. *Geophys Res Lett*, 35(20):L20702. DOI:10.1029/2008GL035287.
- Wu B Y, Su J Z, D'Arrigo R, 2015. Patterns of Asian winter climate variability and links to Arctic sea ice[J]. *J Climate*, 28(17):6841-6858.
- Wu B Y, Su J Z, Zhang R H, 2011. Effects of autumn-winter Arctic sea ice on winter Siberian high[J]. *Chin Sci Bull*, 56(30):3220-3228.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M, 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: a diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events[J]. *J Meteor Soc Japan*, 74:49-62.
- Zhang Y, Sperber K R, Boyle J S, 1997. Climatological and interannual variation of the East Asian winter monsoon: results from the 1979 - 95 NCEP/NCAR reanalysis[J]. *Mon Wea Rev*, 125(10):2605-2619.