

韩荣青,石柳,袁媛,2021. 2020/2021 年冬季中国气候冷暖转折成因分析[J]. 气象,47(7):880-892. Han R Q, Shi L, Yuan Y, 2021. Analysis on the causes of cold and warm transition in China during the winter of 2020/2021[J]. Meteor Mon,47(7):880-892(in Chinese).

2020/2021 年冬季中国气候冷暖转折成因分析*

韩荣青 石柳 袁媛

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: 2020/2021 年冬季,我国气候“前冬冷干、后冬暖湿”特征明显,冷、暖两个阶段气温振幅极大,多地观测气温分别打破了建站以来的最低、最高纪录。前冬(2020 年 12 月 1 日至 2021 年 1 月 10 日),全国大部地区气温偏低、降水偏少,而后冬(2021 年 1 月 13 日至 2 月 28 日),全国大部地区转入明显偏暖期,且 2 月上旬开始我国北方地区降水增多,暖湿特征明显。分析发现,乌拉尔山阻塞高压、西伯利亚高压和东亚冬季风强度、极地冷空气主体位置以及西北太平洋副热带高压的强度和位置等均发生了转折性变化,这是导致我国冬季气候由冷干转为暖湿的直接原因。进一步分析表明:La Niña 事件配合北极冰偏少和北大西洋中纬度暖流,符合启动前冬“暖北极、冷欧亚”效应的条件,导致前冬欧亚中高纬经向环流偏强、乌拉尔山阻塞高压发展、及西伯利亚高压和东亚冬季风偏强,致使我国出现干冷型气候;而后冬,北极平流层发生爆发性增温事件,导致北极涛动持续负位相,极涡主体偏向西半球,但同时乌拉尔山阻塞高压崩溃,东亚冬季风转弱,我国大范围回暖增温。

关键词: 东亚冬季风,冷暖转折,乌拉尔山阻塞高压,La Niña 事件,北极海冰,北大西洋暖流

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.07.011

Analysis on the Causes of Cold and Warm Transition in China During the Winter of 2020/2021

HAN Rongqing SHI Liu YUAN Yuan

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

Abstract: During the winter of 2020/2021, the climate over China was characterized by “cold and dry” in the first half of winter and “warm and wet” in the latter half of winter. In the cold and warm two periods, the amplitude of surface air temperature (SAT) fluctuated extremely, and the observed daily SATs at many stations in China broke the lowest and highest records, respectively. From 1 December 2020 to 10 January 2021, it was cold and dry over most of China, but turned sharply to warm and wet condition during the period from 13 January to 28 February 2021. The overturning changes of the large-scale circulation systems, including the Ural blocking, Siberian high, East Asian winter monsoon (EAWM), the position of the polar cold air and the western Pacific subtropical high, provided the direct reason for the cold-warm transition in China during this winter. Further analysis shows that the La Niña event, coupled with the reduced Arctic ice and the warmer North Atlantic currents in the mid-latitudes, met the conditions for the “warm Arctic, cold Eurasian” effect in the earlier winter. They intensified the meridional circulation with stronger Ural blocking, Siberian high and EAWM, and further led to the cold and dry climate in China.

* 国家自然科学基金委-云南省政府联合基金(U1902209)、国家重点研发计划(2018YFC1505603、2018YFC1506001)、国家自然科学基金项目(41776039)和国家科技支撑计划(2015BAC03B04)共同资助

2021 年 4 月 23 日收稿; 2021 年 5 月 14 日收修定稿

第一作者:韩荣青,主要从事短期气候预测研究. E-mail:hrq@cma.gov.cn

通讯作者:袁媛,主要从事短期气候预测研究. E-mail:yuany@cma.gov.cn

In the latter half of winter, the Arctic experienced a sudden stratospheric warming event, favoring the long-lasting negative Arctic Oscillation. The main body of the polar vortex shifted to the Western Hemisphere, while at the same time, the Ural blocking collapsed and the EAWM weakened. As a result, the temperature in most parts of China suddenly increased to be above normal.

Key words: East Asian winter monsoon (EAWM), transition from cold to warm, Ural blocking, La Niña event, Arctic sea ice, North Atlantic warm current

引言

西伯利亚高压强度、乌拉尔山阻塞高压(以下简称阻高)、东亚冬季风强度,分别从海平面气压、对流层中层高度场、对流层中层风场切变角度,对欧亚大陆冬季中高纬冷空气系统南下势力进行了描述,对中国冬季气候冷暖有很好的指示意义(朱乾根, 1990; Wen et al, 2000; 朱艳峰, 2008; 黄荣辉等, 2014)。东亚冬季风偏强年,对流层中低层乌拉尔山阻高和西伯利亚近地面高压偏强,高压脊前偏北气流有利于引导中高纬度冷空气南下,导致我国中东部大部分地区气温偏低,易发生强降温、强降雪、寒潮及冰冻雨雪等天气气候灾害(郭其蕴, 1994; Zhang et al, 1997; 陈文等, 2013a; 丁一汇等, 2008)。而在东亚冬季风异常偏弱年,乌拉尔山阻高和西伯利亚高压均偏弱,冷空气被低压系统“囚禁”在中高纬度不能南下,我国易出现暖冬(丁婷等, 2017)。

东亚冬季风的气候异常与大气外强迫因子的变化密切相关。El Niño-南方涛动(ENSO)作为全球气候最显著的年际变率气候现象,其与东亚冬季风异常的关系已有不少研究(陈文, 2002; 陈文等, 2018; Dai et al, 2015; Shi and Qian, 2018),指出 El Niño 事件发生期间,通常东亚冬季风偏弱,而 La Niña 发生期间,东亚冬季风易偏强。而 ENSO 影响热带和副热带地区气候异常的物理机制更加显著,即 El Niño (La Niña) 异常海温会通过激发不同性质的罗斯贝波,导致菲律宾海附近对流层中低层出现异常的反气旋(气旋)环流(Zhang et al, 1996; Wang et al, 2000; Wang and Zhang, 2002; 袁媛等, 2014)。

东亚冬季风强度的年际变化也受到中高纬度气候异常的影响。秋季北极海冰融化的多少对东亚冬季风有重要影响,尤其是秋、冬季喀拉海至巴伦支海海区海冰(BKS)面积变化与东亚冬季风强度存在密切的关系(武炳义等, 1999)。但是,2000年以来秋

季北极海冰持续偏少,其对东亚冬季风的影响存在一定的不确定性。进一步研究表明,秋、冬季 BKS 异常偏少,配合前期夏季北极大气环流厚度偶极模态负位相时,易导致冬季西伯利亚高压偏强,而在偶极模态正位相时,冬季西伯利亚高压则偏弱(Wu et al, 2016; 武炳义, 2018)。另一方面,北大西洋暖流(在中低纬度称为墨西哥湾暖流)是全球已知流速最快、最强的暖洋流,也是最主要的向北极输送热量的洋流。近几年冬季曾观测到北极气温在一天内升温 30℃ 以上,例如 2015 年 12 月 30 日,北极气温在一夜之间从 -35℃ 上升到 1℃。许多研究表明,秋、冬季北大西洋暖流偏强,会导致北极海冰偏少。前冬北大西洋中纬度暖海温异常会激发北大西洋东部低压、俄罗斯西部高压(乌拉尔山阻高)的大气长波,导致北极出现暖高压,并与南侧乌拉尔山阻高连成一体,形成异常偏强、位置偏北的高压,其脊前偏北气流将极地冷空气直接输送到欧亚中纬度,最终导致暖北极冷欧亚效应(李崇银和顾薇, 2010; Sato et al, 2014; Luo et al, 2016a; 2016b; Chen et al, 2019),这期间,西伯利亚高压和东亚冬季风指数均表现出偏强的特征。这些研究更加强调了北大西洋暖流对东亚冬季风偏强的重要作用,而北极海冰偏少起到了放大暖北极冷欧亚的效应。北大西洋暖流偏强时,在北大西洋中纬度表现出异常偏暖的海表温度,其异常暖海温可以从前期盛夏持续到随后的冬季(Chen et al, 2019)。

尽管 ENSO 事件不能解释很多中高纬度气候异常,如冬季欧亚大陆的降温趋势,但观测表明,1981 年以来的 13 个 La Niña 事件(不包括 2020/2021 年 La Niña 事件)有 10 年冬季我国大部偏冷,仅 3 年我国大部偏暖。因此热带与中高纬度海洋的海温异常、北极冰异常以及平流层信号等对我国冬季气候存在复杂的耦合影响,其物理机制是复杂多变的(陈文等, 2013a; 2013b),这也给短期气候预测带来了很大挑战。为了提高冬季气候预测水平,近年对每年冬季气候异常的成因开展了深入分析和再

认识(王东阡等,2015;司东等,2016;宋文玲和袁媛,2017;丁婷等,2017;章大全和宋文玲,2018;支蓉和高辉,2019;赵俊虎等,2020),以期为冬季气候预测提供更多有价值的信息参考。

2020/2021年冬季,我国气温总体偏高,但属于前冬冷、后冬暖的冷暖转折年份,冷、暖阶段气温振幅极大,多地区气温打破了建站以来最低和最高纪录;全国降水总体偏少,呈现北方偏多、南方偏少的特点,北方降水主要发生在后冬转暖时期,因此2020/2021年冬季气候特点可以概括为“前冬冷干、后冬暖湿”。我国气候为什么呈现如此“冷干”与“暖湿”两个极端异常?哪些机制或因素起到主导作用?外强迫(海温、海冰等)和大气环流影响系统如何配置导致我国“前冬冷干、后冬暖湿”气候?本文将针对以上问题展开分析,并试图揭示我国前后冬气候“冷干”转向“暖湿”的可能原因,为今后的气候预测服务工作提供参考。

1 资料和方法

本文使用的资料主要有:

(1)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)”的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月以来的气温、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的数据;(2)大气环流资料为NCEP/NCAR提供的逐日、逐月再分析资料(Kalnay et al,1996),水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$;(3)海温观测资料为NOAA提供的全球逐月海温资料OISST v2(Reynolds et al,2007),水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$;大气环流和海温资料长度均为1948年1月至2020年2月;(4)北极海冰资料为美国冰雪数据中心(NSIDC)提供的北极海冰覆盖范围数据(Parkinson,2014);(5)北极涛动(AO)逐月和逐日标准化指数来自美国CPC/NCEP(<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>)。

东亚冬季风指数、西伯利亚高压指数、西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)各项指数、Niño3.4指数、SOI(Southern Oscillation index)指数来自国家气候中心的“气候与气候变化监测预测系统”。其中东亚冬季风指数采用两种指数:(1)朱艳峰(2008)定义的指数,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°E 范围内500 hPa纬向风的平均值,并对差值进行标准化处理;(2)Wen et al(2000)定义的东亚冬季风指数,即分别计算 $25^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}$ 、 $120^{\circ} \sim 140^{\circ} \text{E}$ 和 $10^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{N}$ 、 $110^{\circ} \sim 130^{\circ} \text{E}$ 两块区域的区域平均的1000 hPa经向风距平,再以两个距平结果之差作为指数。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,并对其进行标准化处理。

文中部分图形出自国家气候中心开发的“气象灾害影响评估系统”“气候与气候变化监测预测系统”。气候常年值为1981—2010年的平均值,冬季指的是当年12月至次年2月,例如2020/2021年冬季为2020年12月至2021年2月。

2 2020/2021年冬季我国气候异常特征

2020/2021年冬季,全国平均气温为 -2.5°C ,较常年同期(-3.35°C)偏高 0.9°C ,为1961年以来第九高值(图1a)。从气温距平空间分布(图1b)可以看出,除东北部分地区、内蒙古东北部、新疆北部、西南地区东南部局部、海南等地气温较常年同期偏低 $0.5 \sim 2^{\circ} \text{C}$ 外,全国其余大部地区的气温接近常年同期或偏高,尤其我国中东部大部 and 西南地区大部气温偏高 1°C 以上。

根据国家气候中心冷空气监测标准(王遵娅等,2017),2020/2021年冬季共有9次冷空气过程影响我国,冷空气累积日数为30 d(表1),次数接近常年同期(10.7次)。其中,一般性冷空气过程1次,强冷空气过程3次,全国型强冷空气过程和寒潮合计5次。2021年1月6—8日的全国型寒潮过程,影响范围大,低温极端性强,北京、河北、山东、山西等省(直辖市)50余个国家级气象观测站的最低气温达到或突破建站以来最低纪录,其中北京大部分地区最低气温在 $-24 \sim -18^{\circ} \text{C}$,南郊观象台达 -19.6°C ,为1951年以来第三低。

2020/2021年冬季,气温起伏大,前冬异常偏冷,后冬异常偏暖。冬季我国逐月气温距平图表明,12月,除东北北部、西藏、西南地区西部和南部及东南沿海部分地区偏暖外,全国其余大部地区气温较常年同期偏低,其中内蒙古中西部、新疆北部和贵州等地气温偏低 $2 \sim 4^{\circ} \text{C}$,局部偏低 $4 \sim 8^{\circ} \text{C}$ (图2a);1月,西藏、西南地区西部、中东部大部偏暖,而内蒙古东部、东北

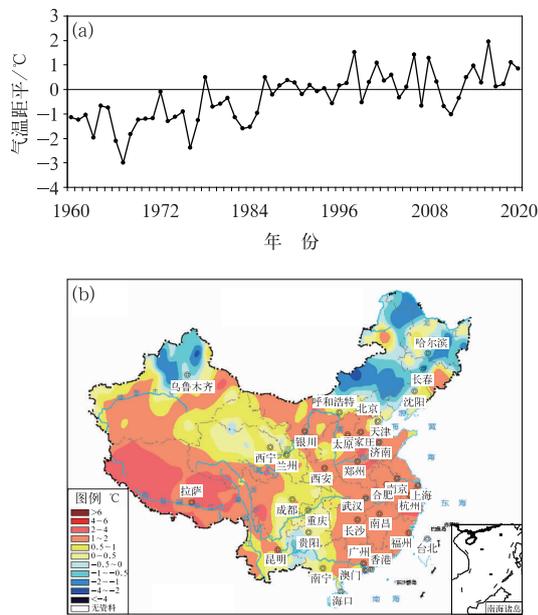


图 1 1960/1961—2020/2021 年冬季全国平均气温历年变化(a)及 2020/2021 年冬季全国气温距平分布(b)

Fig. 1 Time series of winter mean temperature over China during 1960/1961—2020/2021 (a) and distribution of temperature anomalies in China in winter 2020/2021 (b)

大部、新疆北部、西北地区中部、西南东部和华南沿海气温偏低(图 2b);2 月,除东北北部、内蒙古东北部局部气温偏低外,全国其余大部地区气温明显偏高(图 2c)。2 月全国平均气温为 1.23℃,较常年同期(-1.7℃)偏高 2.93℃,位列 1951 年以来历史同期第一高。期间,全国超过 25%的市(县)日最高气温突破 2 月历史极值,主要出现在华北、黄淮、江淮、江汉和西北地区东部。

从全国平均气温的逐日演变也可以看出,2020/2021 年冬季全国平均气温的阶段变化显著。2020 年 12 月 1 日至 2021 年 1 月 10 日,全国总体偏冷,偏冷时段累计 41 d,其中 2021 年 1 月 6—8 日达到冬季气温最低阶段,最低日平均气温距平达到-4.4℃;但 1 月 12 日以后全国迅速回暖,累计偏暖时段为 48 d,其中 2 月下旬达到偏暖最高阶段,最高日均气温距平达到 5.6℃(图 2d)。由此可见,偏冷期和偏暖期日平均气温变化均具有很大振幅,冷、暖极端性特征都很明显。

图 3 是 2020/2021 年冬季偏冷时段(2020 年 12 月 1 日至 2021 年 1 月 10 日)和偏暖时段(2021 年 1 月 13 日至 2 月 28 日)平均的气温距平空间分布(未包括的 2021 年 1 月 11—12 日是我国冷暖气候转折

表 1 2020/2021 年冬季冷空气过程

Table 1 Cold air events in China in winter 2020/2021

序号	开始时间/年-月-日	结束时间/年-月-日	持续天数/d	冷空气类型
1	2020-12-13	2020-12-15	3	全国型强冷空气过程
2	2020-12-29	2021-1-1	4	全国型寒潮过程
3	2021-1-6	2021-1-8	3	全国型寒潮过程
4	2021-1-14	2021-1-19	6	全国型强冷空气过程
5	2021-1-26	2021-1-27	2	一般冷空气过程
6	2021-2-2	2021-2-3	2	强冷空气过程
7	2021-2-7	2021-2-8	2	强冷空气过程
8	2021-2-14	2021-2-17	4	寒潮过程
9	2021-2-22	2021-2-25	4	强冷空气过程

的过渡期,因此没有分在偏冷和偏暖时段内)。偏冷时段,除东北北部、西藏、西南地区西部气温偏高外,全国其余大部地区气温偏低,其中西北地区大部、内蒙古中部和西部、华北北部和西部、西南地区东部等地气温偏低 2~4℃,局部偏低 4~8℃(图 3a);偏暖时段,除东北北部、内蒙古东北部局部、西南部分地区气温接近常年到偏低外,全国其余大部均偏暖,其中内蒙古西部、华北西部、黄淮、江淮、江南中部和东部、华南北部气温偏高 4~6℃(图 3b)。

2020 年冬季,全国平均降水量为 31.2 mm,较常

年同期(41.9 mm)偏少 25.5%,自 2009 年以来最少(图 4a)。从空间分布来看,内蒙古东部、东北大部、华北中南部、黄淮、江汉、西北地区东部部分地区、新疆北部和西部局部、西南地区东部等地降水较常年同期偏多,其中华北南部、黄淮、西北东部局地等地偏多 1 倍以上;全国其余大部地区降水较常年同期偏少 2~5 成,其中新疆东部、青海南部、西藏东部和西南部、云南大部,以及江南东部和华南东部的部分地区偏少 5 成以上(图 4b)。

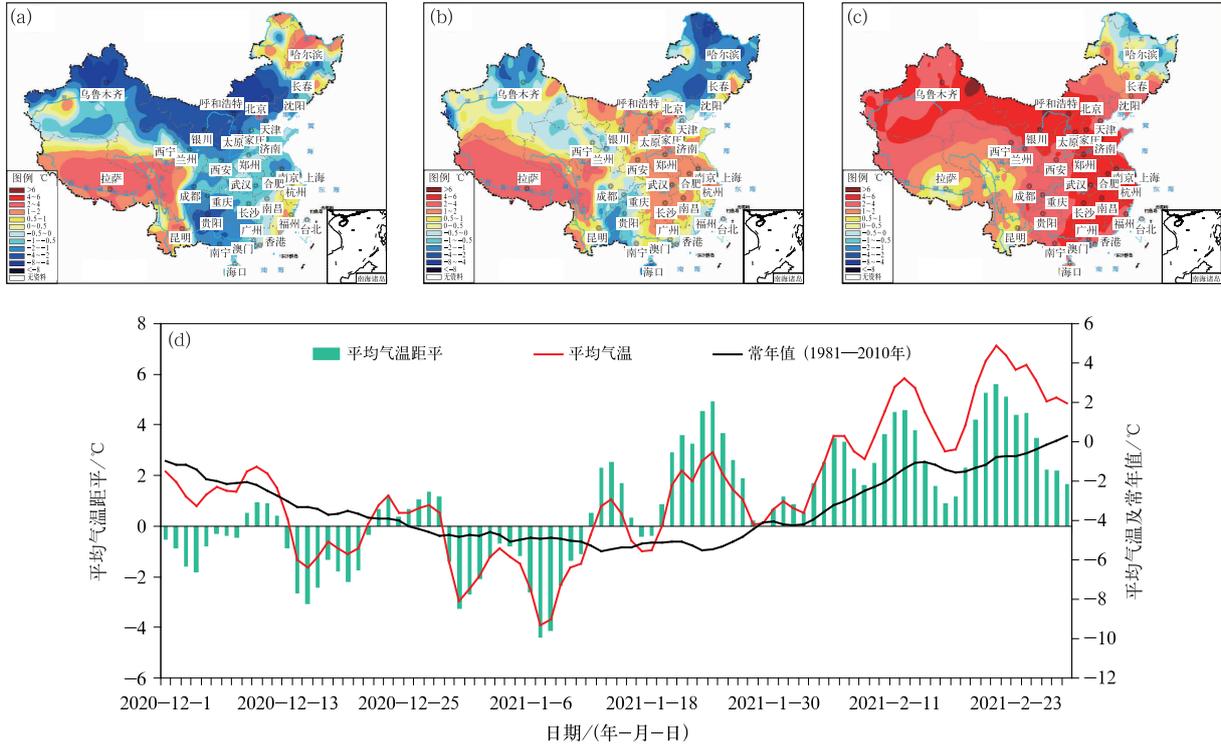


图 2 2020 年 12 月(a)、2021 年 1 月(b)和 2 月(c)全国气温距平分布,及(d)2020/2021 年冬季全国平均气温、全国平均气温距平和全国平均气温常年值的逐日变化

Fig. 2 Distribution of temperature anomalies of China in December 2020 (a), January 2021 (b), February 2021 (c); and daily variation of mean temperature and its anomalies in China during winter 2020/2021, and the climate mean (d)

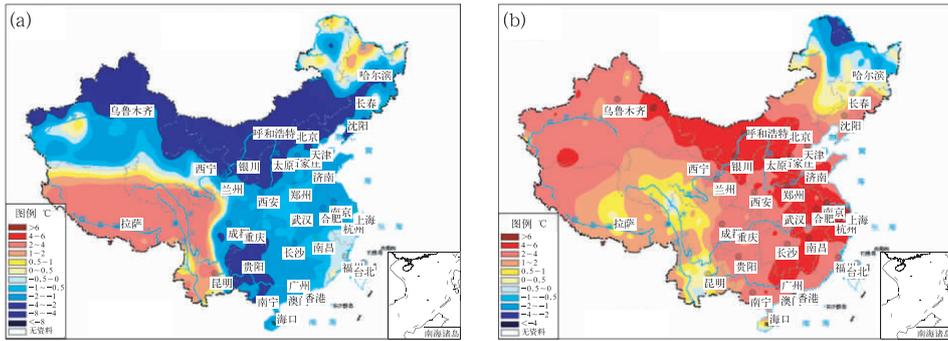


图 3 2020/2021 年冬季偏冷期(a,2020 年 12 月 1 日至 2021 年 1 月 10 日)和偏暖期(b,2021 年 1 月 13 日至 2 月 28 日)全国气温距平空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of temperature anomalies separately during colder (a, 1 December 2020 to 10 January 2021) and warmer (b, 13 January to 28 February 2021) periods in China in winter 2020/2021

冬季降水呈前期偏少后期偏多的特点。与常年同期相比,2020 年 12 月,除西北地区中东部、西南北部部分地区降水偏多外,全国其余大部地区降水偏少(图 5a);2021 年 1 月,降水异常偏多的区域主要在我国东北地区,内蒙古东部和西南地区北部部分地区,

其余大部地区降水明显偏少,其中内蒙古东北部、东北大部偏多 1 倍以上(图 5b);2021 年 2 月,降水偏多范围较前期明显增大,东北大部、内蒙古中东部、华北大部、黄淮、江汉、西北地区东部、新疆北部和西部、西南地区东部和南部、江南西部和华南西部等地降水偏

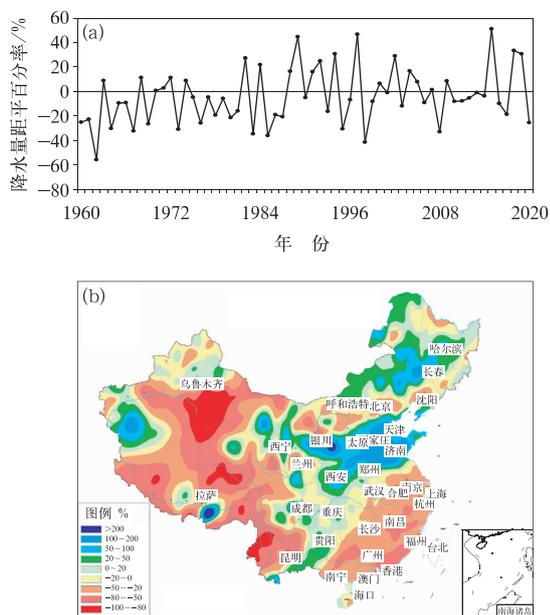


图 4 同图 1, 但为降水量距平百分率
Fig. 4 Same as Fig. 1, but for precipitation anomaly percentage

多, 其中华北中南部、黄淮大部、西北地区东部部分地区和西南东南部等地偏多 2 倍以上, 我国其余地区降

水偏少 2~5 成, 部分地区偏少 5 成以上(图 5c)。从全国平均降水的逐日变化来看, 截止 2021 年 2 月 7 日, 2020 年 12 月和 2021 年 1 月全国降水总体处于偏少阶段, 2021 年 2 月 8 日以后主要发生两次强降水过程, 分别是 2 月 8—12 日和 25—28 日, 降水较常年同期偏多(图 5d)。

3 2020/2021 年冬季北半球大气环流异常特征

3.1 北半球大尺度环流

鉴于 2020/2021 年冬季我国气候呈“前冬冷干、后冬暖湿”的特点, 下面将针对前冬(2020 年 12 月 1 日至 2021 年 1 月 10 日)和后冬(2021 年 1 月 13 日至 2 月 28 日)两个时段的环流异常进行分析。

前冬时段平均的北半球 500 hPa 高度及其距平场显示(图 6a), 中高纬度乌拉尔山阻高偏强, 其与巴伦支海至喀拉海的高压连通, 西伯利亚至远东地区为低压槽区, 极地冷气团(高度负距平区域)主体偏在东

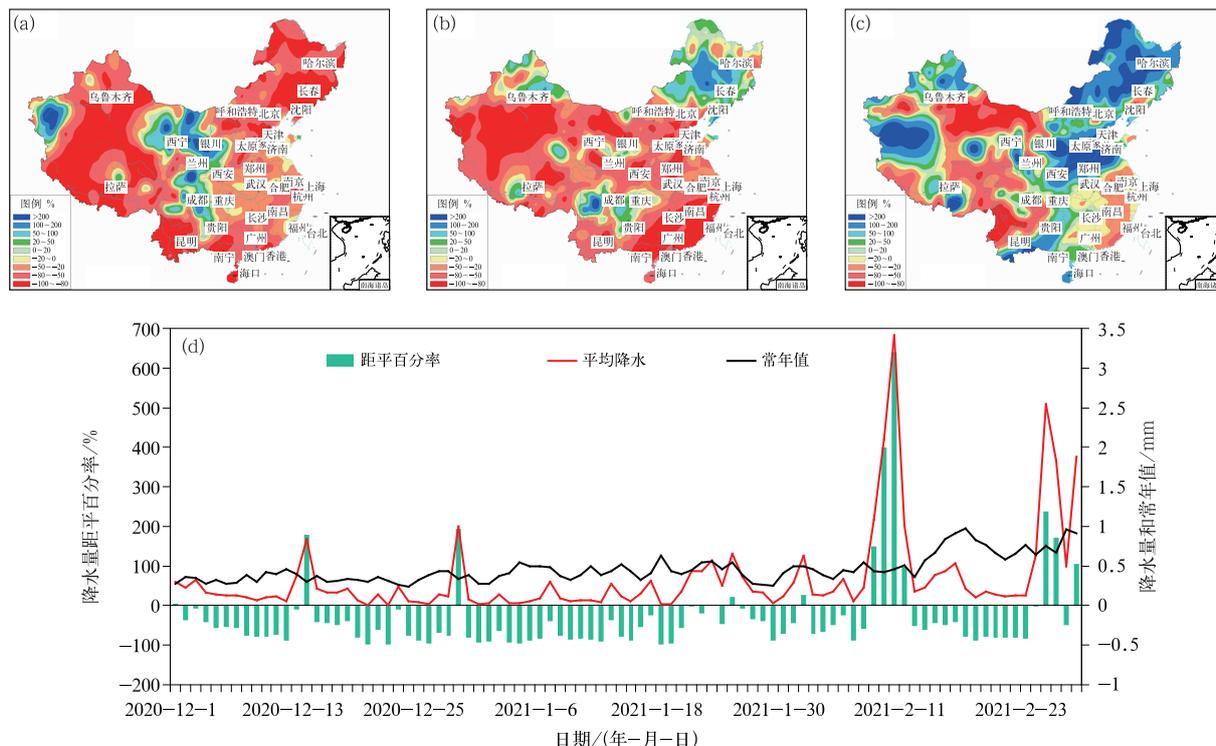


图 5 同图 2, 但为降水量距平百分率
Fig. 5 Same as Fig. 2, but for precipitation anomaly percentage

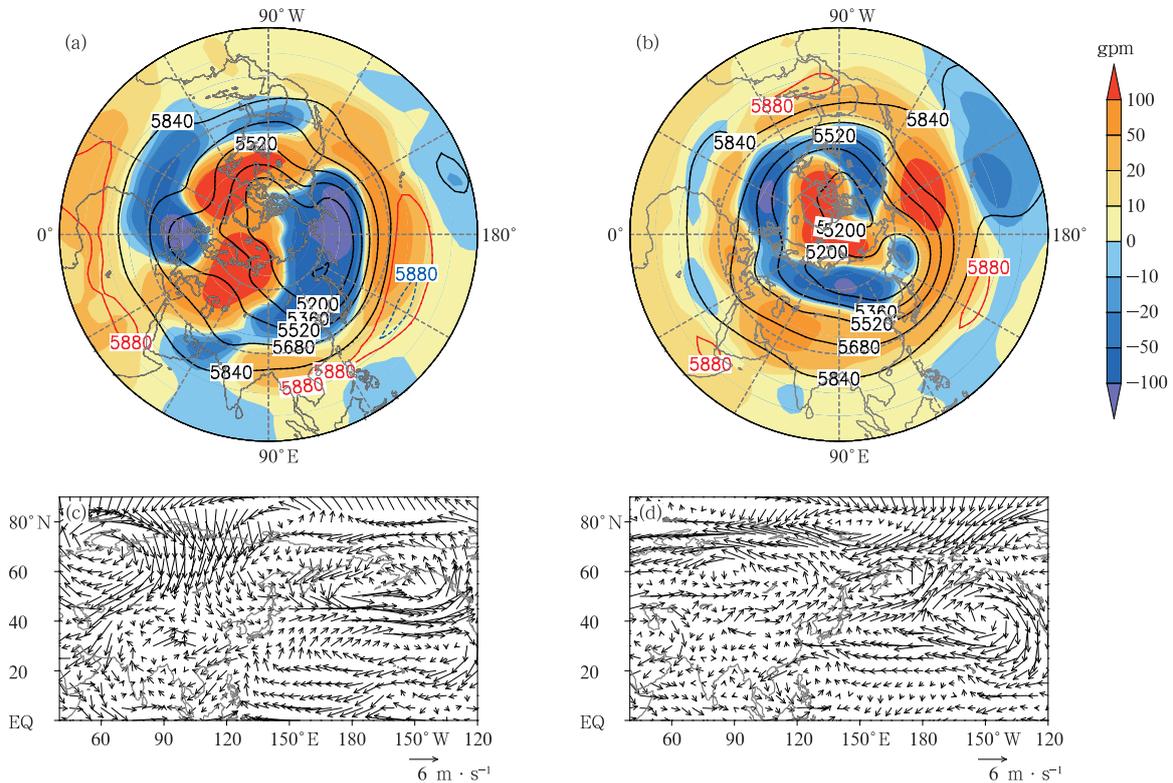


图 6 2020 年冬季偏冷期(a,c)和偏暖期(b,d)平均 500 hPa 高度场(等高线,单位:gpm)和距平场(填色)(a,b;红色等值线表示 5880 gpm,蓝色线表示气候平均的 5880 gpm)及 850 hPa 风场距平(c,d)

Fig. 6 The 500 hPa geopotential height (contour, unit: gpm) and anomalies (colored) (a, b; red and blue contours denote separately the real time and climatology of 5880 gpm geopotential height) and 850 hPa wind anomalies (c, d) during the colder (a, c) and warmer (b, d) periods, in winter 2020/2021

半球,低纬度地区西太副高面积偏大、西伸脊点偏西,印缅槽偏弱。同期 850 hPa 风场距平上(图 6c),北极巴伦支海至喀拉海一带的北风距平南下直通中国大陆深处,中国南海至菲律宾附近的异常气旋加强了北风距平在中国南方的盛行,这种环流形势有利于偏强的乌拉尔山阻高将极地冷空气直接输送到中国大陆,从而导致大陆东侧为北风异常,同时强大的西太副高主体位于菲律宾以东,其外围水汽吹向日本以东海域,从而造成了前冬我国干冷型气候。

在后冬时段,影响我国的大气环流出现了转折。北半球 500 hPa 高度及其距平场显示(图 6b),乌拉尔山为高度场负距平,极地冷空气缺乏高压脊前偏北气流的动力输送而不能到达较低纬度,极地冷气团部分偏在西半球,西太副高较前期明显面积缩小、西伸脊点东移。同期 850 hPa 风场距平场上(图 6d),欧亚中高纬度至我国北方东部地区盛行南风异常,中国南海

至菲律宾依然为异常气旋环流,大陆东部沿海和近海为东风(向岸风)异常,这种环流异常形势得影响我国的冷空气势力偏弱,同时输送到东北和华北地区的水汽充沛,从而造成了后冬我国暖湿型气候。

值得注意的是,2021 年 1 月 5 日开始北极地区平流层经历了一次偏移型(Charlton and Polvani, 2007)爆发性增温过程,而研究发现北半球平流层爆发性增温平均每 10 年发生约 6 次(Kidston et al, 2015)。2021 年 1 月中旬开始,平流层爆发性增温信号下传至对流层,并导致 AO 持续负位相。对流层极涡主体偏向西半球,导致北美大部遭受极寒天气;而极涡的另一部分偏在西西伯利亚,导致乌拉尔山阻高崩溃(图 6b),西伯利亚高压和东亚冬季风强度由此转弱,我国转为纬向型环流和高压脊控制,大部地区气温迅速回升,且转为异常偏高。这次北半球环流形势和东西半球气温的转折与 Kidston et al(2015)描述的研究

结果一致,针对此次平流层爆发性增温详细的过程分析和气候影响将另文分析。

3.2 东亚冬季风活动特征及影响

2004 年冬季以来,东亚冬季风(朱艳峰,2008)和西伯利亚高压均开始转强(Wang and Chen, 2014)。在 2020/2021 年冬季,西伯利亚高压标准化指数为

-0.03,接近常年同期。但是,不同东亚冬季风指数表达的冬季风强度不同,朱艳峰(2008)用对流层中层纬向风切变表示的东亚冬季风标准化指数为-0.53(图 7 中东亚冬季风指数-Zhu),较常年同期偏弱;而 Wen et al(2000)使用对流层低层东亚东部经向风表示的东亚冬季风指数为 1.88(图 7 中东亚冬季风指数-Chen),较常年异常偏强。

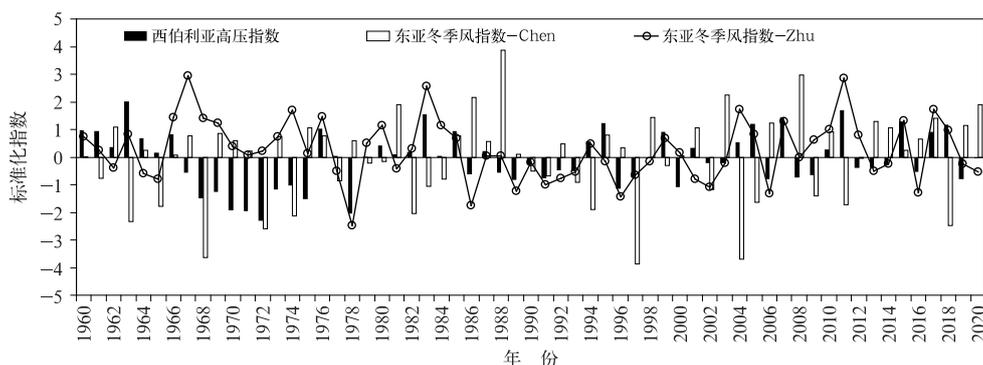


图 7 1960/1961—2020/2021 年冬季东亚冬季风强度(Zhu 指数:折线,Chen 指数:白色柱状)和西伯利亚高压强度(黑色柱状)标准化指数历年变化

Fig. 7 Variation of standardized East Asian winter monsoon index (curve; Zhu index; white bar; Chen index) and Siberian high intensity index (black bar graph) during winter 1960/1961—2020/2021

2020/2021 年冬季东亚冬季风逐候变化很好地说明了前后冬我国气温的转折变化(图 8)。东亚冬季风指数(Zhu 指数,图 8a;逐候 Chen 指数有类似变化,图略)和西伯利亚高压(图 8b)逐候实况监测可见,两者总体均在前冬强于气候平均,在 1 月第 3 候开始总体较常年平均偏弱,与冬季气温的转折变化一致。

除了东亚冬季风异常以外,AO 的异常表明极地冷空南下气活动的强度,当 AO 为正位相时,极地冷空气主要在北极地区活动,欧亚大陆偏暖为主,当 AO 为负位相时,极地冷空气易分裂南下,对北半球中低纬度地区影响较大(陈文和康丽华,2006;陈文等,2013a;2013b)。2020/2021 年冬季 AO 标准化指数为-1.5,为 1960/1961 年冬季以来历史第七低值,也是近 10 年的最低值,即 AO 表现为异常偏强的负位相(图 9)。AO 逐日变化表明,冬季大部分时段,AO 都处于负位相,仅在 2 月中旬以后转为正位相(图 10),AO 在冬季累计负位相时间长达 75 d,历史少见。

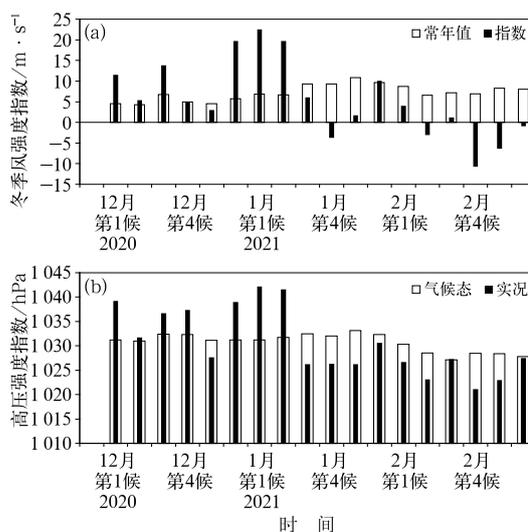


图 8 2020/2021 年冬季东亚冬季风强度指数(a,Zhu 指数)和西伯利亚高压强度指数(b)逐候演变(方框柱状:气候态,黑色柱状:实况)

Fig. 8 Pentad variation of East Asian winter monsoon intensity index (a, Zhu index) and Siberian high intensity index (b) in winter 2020/2021 (box histogram: climatology, black histogram: observation)

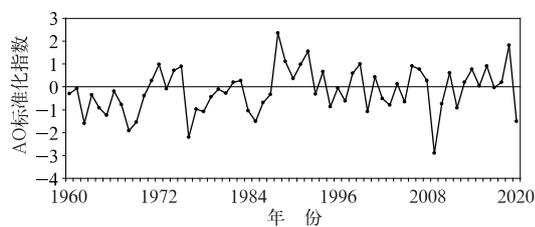


图 9 1960/1961—2020/2021 年
冬季 AO 标准化指数历年变化

Fig. 9 Annual variation of standardized AO
index in winter 1960/1961–2020/2021

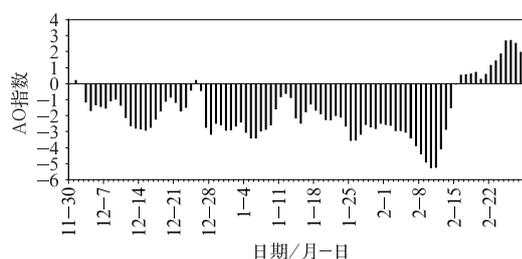


图 10 2020/2021 年冬季 AO 指数逐日演变

Fig. 10 Daily variation of standardized
AO index in winter 2020/2021

4 2020/2021 年冬季前期东亚冬季风异常偏强的可能原因

4.1 中等强度的 La Niña 事件

南北半球太阳辐射的差异和海陆热力差异是季风形成的主要原因,其中海陆热力差异的年际变化会引起季风的年际异常。ENSO 作为年际尺度上热带海气系统的最强信号,对东亚冬季风有重要的影响(李崇银和穆明权,2000;陈文,2002)。2020 年 8 月起赤道中东太平洋发生了一次中等强度 La Niña 事件,截止 2021 年 3 月 La Niña 事件虽有减弱但仍在持续。从 2020/2021 年冬季全球海表温度距平(SSTa)场的空间分布可见(图 11),赤道中东太平洋为大范围的负海温距平,负距平中心位于日界线附近,中心强度低于 -1°C 。从 Niño3.4 指数和 SOI 指数的逐月演变可见,Niño3.4 指数负指数对应了 SOI 的正位相,表明热带大气与 SST 异常保持高度耦合,热带大气响应特征明显;2020 年 10 月至 2021 年 1 月为此次 La Niña 事件的盛期,其中,Niño3.4 指数于 10 月达到最低值 -1.4°C (图 12)。研究表明,在 La Niña (El Niño)盛期冬季东亚冬季风往往偏强(偏弱),这一影

响主要是通过 La Niña (El Niño)在对流层低层激发西北太平洋异常气旋(反气旋)和北风(南风)来实现的(图 6c,6d),对应西太副高强度减弱(增强)、面积减小(增大),西伸脊点偏东(西)(图 6a,6b)(Zhang et al, 1997;Wang et al,2000;陈文,2002)。因此,于 2020 年秋冬季达到盛期的中等强度的 La Niña 事件对冬季前期异常偏强的东亚冬季风有重要作用。

4.2 秋季北极海冰异常偏少

受全球变暖影响,北极地区变暖的速度是全球其他地区的 6~7 倍(Cohen et al,2014;Huang et al, 2017),导致大量冰川融化,海冰消融,2020 年 9 月北极海冰达到 1979 年以来历史第二少(图 13a)。北极增暖和北极海冰减少,同时赤道中东太平洋发生 La Niña 事件,两者共同导致极地与赤道之间的温度差减小,从而加强了中高纬环流的经向度,这为 2020/2021 年冬季前期的东亚冬季风偏强提供了重要的气候背景(Zheng et al,2021)。

另一方面,已有研究表明,9 月北极海冰偏少有利于冬季西伯利亚高压偏强,两者相关系数低于 -0.45 ,可通过 0.05 的显著性水平检验(Wu and Wang,2002;Wu et al,2011)。进一步研究发现,9 月海冰偏少对冬季西伯利亚高压的影响还依赖于前期夏季北极地区的大气环流型,即夏季北极偶极子风场模态(Arctic dipole wind pattern,即 AD 模态)。如果 9 月北极海冰偏少,同时夏季北极地区表现出显著的 AD 模态负位相(即北极上空低层风场为反气旋异常,海平面气压正距平,而巴伦支海—喀拉海附近为气旋异常,海平面气压负距平),那么冬季西伯利亚高压偏强的概率更高(Wu et al,2016)。2020 年夏季监测显示,北极地区大气环流表现出典型的 AD 负位相(图 13b),其模态指数也达到历史最低值。因此,2020 年秋季北极海冰异常偏少叠加前期夏季典型 AD 负位相是导致 2020/2021 年冬季前期西伯利亚高压持续偏强的重要原因。

极冰偏少会放大北大西洋暖流激发的“暖北极冷欧亚”效应(Sato et al,2014;Luo et al,2016a;2016b;Chen et al,2019),尤其是在前冬这种影响效应显著(Sato et al,2014)。异常偏强的北大西洋暖流会使得北大西洋中纬度 SST 偏暖,同时,暖洋流会使北极冰减少,在北极形成一个暖高压,结合北大西洋东部气压负变高与北极巴伦支海至乌拉尔山的正变高形成大气遥相关(EA/WR)。在近几年北极冰偏少的背景下,乌拉尔山阻高表现得更为持久和稳定,且位置

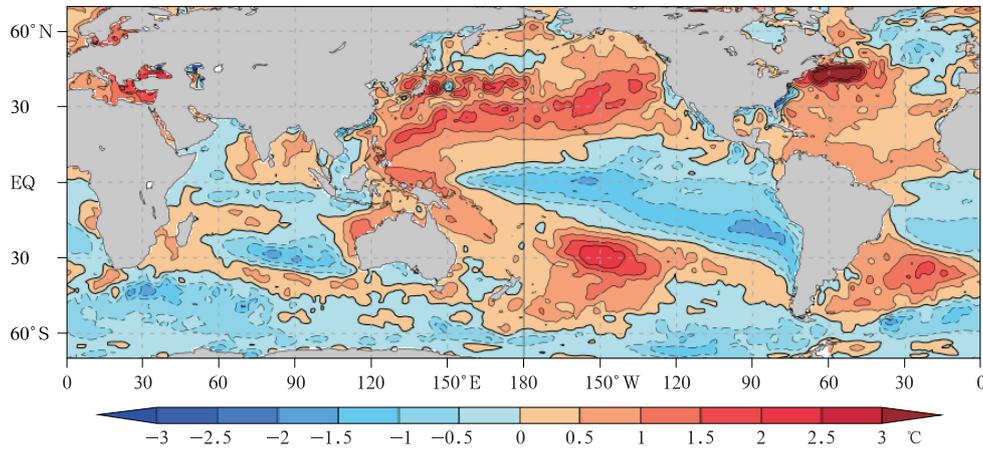


图 11 2020/2021 年冬季全球海温距平场

Fig. 11 Distribution of sea surface temperature (SST) anomalies in winter 2020/2021

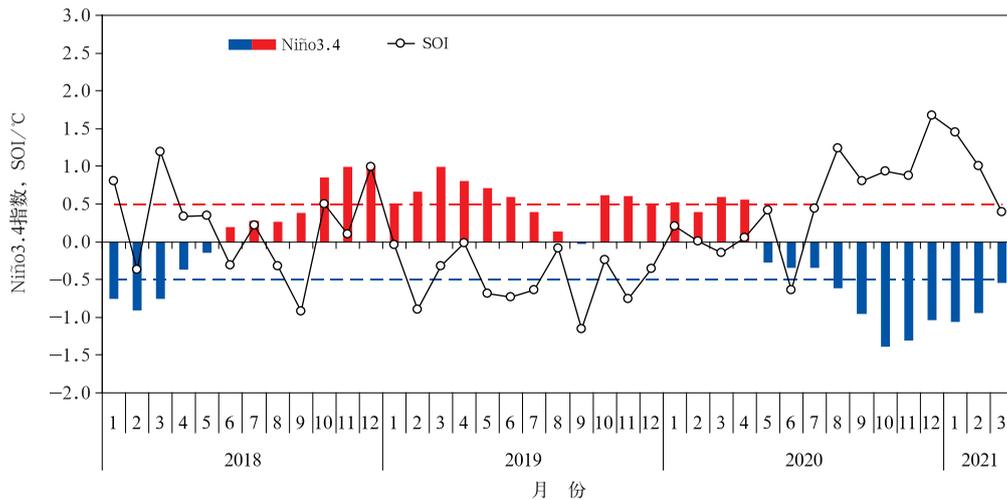


图 12 2018 年 1 月至 2021 年 3 月 Niño3.4 指数和南方涛动指数(SOI)逐月演变

Fig. 12 Monthly variation of Niño3.4 index and standardized Southern Oscillation index (SOI) from January 2018 to March 2021

较早些年代偏北(Yao et al, 2017; Luo et al, 2017)。2020 年盛夏至 2020/2021 年冬季,北大西洋中纬度 SST 持续偏高,表明北大西洋暖洋流向北极的热量输送偏强,期间秋季至冬季北极海冰偏少,北极巴伦支海一带暖高压偏强,大气 EA/WR 遥相关型建立,这可能正是前冬乌拉尔山阻高和东亚冬季风偏强的主要原因,观测显示欧亚中纬度气温异常偏低,“暖北极冷欧亚”效应显著。同时,La Niña 事件加强了这种气候偏冷效应,从而导致我国前冬大范围盛行偏北风(图 6c)、气候干冷。

尽管 ENSO 事件、北大西洋暖流、北极冰偏少这些外强迫因子的相互作用过程目前还没有完全研究

清楚,但它们的协同作用对 2020/2021 年前冬东亚冬季风偏强的重要影响是毋庸置疑的。

5 结论与讨论

利用多种观测和再分析资料,本文详细分析了 2020/2021 年冬季我国主要气候特征、大尺度大气环流异常、东亚冬季风活动特征及可能的的外强迫因子,得到以下结论:

(1)2020/2021 年冬季,全国平均气温为 -2.5°C ,较常年同期偏高 0.9°C ,为 1961 年以来第九高值。期间,我国气候呈“前冬冷干、后冬暖湿”特征,偏冷期和

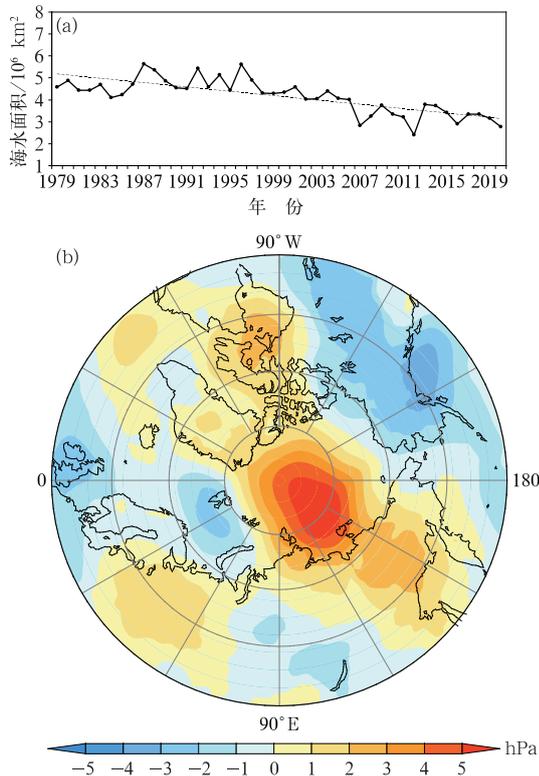


图 13 (a)1979—2020 年 9 月北极海冰范围历史序列 (引自 <https://nsidc.org/arcticseaicenews/>, 虚线表示线性趋势), 及 (b)2020 年夏季北半球海平面气压距平空间分布

Fig. 13 (a) Average monthly Arctic Sea ice extent in September 1979—2020 (cited from <https://nsidc.org/arcticseaicenews/>, with the dashed line indicating the linear trend), and (b) distribution of sea level pressure anomaly in the Northern Hemisphere in summer (June—July—August) 2020

偏暖期气温起伏大,冷暖极端性明显。从全国平均气温和降水的逐日演变来看,前冬(2020年12月1日至2021年1月10日)全国大部偏冷降水偏少,两个偏冷中心分别分布在内蒙古中西部到西北地区大部、以贵州为中心的西南地区东部到华南西部;期间发生了2次全国型寒潮天气和1次全国性强冷空气过程,尤其在1月6—8日期间,我国北方大部、西南地区东部和华南西部等地遭受极寒天气,多地日最低气温打破纪录。而后冬(2021年1月13日至2月28日)明显转暖,其中2月下旬达到偏暖最高阶段,内蒙古中西部、华北西部、西北北部为暖中心;2月全国平均气温也为1951年以来冬季最高,多地日最高气温突破历史极值;偏暖期间,华北、东北、西北地区东部、西南地区东部和华南西部等地降水明显偏多,其中华北中南部、黄淮、西北地区东部和西南地区东南部等地偏多

2倍以上。

(2)2020/2021年冬季,东亚冬季风前冬偏强、后冬偏弱,冬季风季节内强弱转换阶段性特征显著。前冬,AO呈负位相,极地冷气团偏在东半球,乌拉尔山阻塞高压异常偏强,西伯利亚高压和东亚冬季风偏强,欧亚中高纬以经向环流为主,南海至菲律宾对流层低层受异常气旋控制,环流形势有利于极地冷空气沿乌拉尔山阻高脊前气流直接南下影响我国。同时,西太副高异常偏强、西伸脊点偏西,但副高主体位于菲律宾以东,其西北部外围的南风异常将水汽吹向日本南侧及其以东洋面,而我国大陆及东侧海面盛行北风异常、水汽条件偏差,由此导致前冬我国大部地区气候干冷。而后冬,受平流层1月初的爆发性增温影响,AO持续负位相,但北极冷气团主体偏到西半球,欧亚中高纬转为纬向环流,前冬影响我国的环流系统异常发生逆转,从而导致后冬我国主要呈暖湿型气候。

(3)一次中等强度的La Niña事件于2020年8月开始,截止2021年3月La Niña事件虽有减弱但仍在持续。冷海温异常激发热带西北太平洋气旋异常,进而有利于东亚冬季风的发展和南下。2020年秋季,北极海冰偏少达历史第二,配合前期夏季北极地区大气环流典型的AD负位相,导致冬季前期西伯利亚高压异常偏强。因此,La Niña事件配合北大西洋中纬度暖海温和北极冰偏少,是导致前冬欧亚中高纬经向环流偏强、乌拉尔山阻高发展、及西伯利亚高压和东亚冬季风偏强的主要原因,并最终导致“暖北极冷欧亚”效应的发生。

平流层和对流层大气是地球气候系统中的重要组成部分,在北半球冬季,两者的动力耦合十分密切(黄荣辉等,2018;吕达仁等,2009;Baldwin et al, 2009)。在冬季,对流层大气动力过程耦合于平流层环极地西风急流流速的波动。当平流层西风急流增速时,会引起对流层急流向极地偏移,极地冷气团向北极收缩;反之,当平流层绕极地西风急流减弱时,对流层急流向赤道偏移,极地冷气团发生位置偏移或分裂并向南爆发,进而对地面天气造成影响,北欧和美国东部极端低温发生的可能性更高(Kidston et al, 2015)。2021年1月初发生了一次平流层爆发性增温事件,1月下旬平流层信号下传至对流层,并对对流层AO负位相的持续起到了重要作用。2020/2021年冬季AO负位相累计天数长达75d,历史少见。另一方面,2020/2021年冬季前期AO负位相期间,对流层

极涡偏在东半球,导致我国大部气温偏低;而后期 AO 负位相时,极涡主体偏在西半球,造成北美极寒。AO 负位相期间极涡偏移的具体物理机制及平流层爆发性增温的详细过程和可能的气候影响值得进一步分析研究。

参考文献

- 陈文,2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响[J]. 大气科学,26(5):595-610. Chen W,2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon [J]. Chin J Atmos Sci,26(5):595-610(in Chinese).
- 陈文,丁硕毅,冯娟,等,2018. 不同类型 ENSO 对东亚季风的影响和机理研究进展[J]. 大气科学,42(3):640-655. Chen W, Ding S Y, Feng J, et al,2018. Progress in the study of impacts of different types of ENSO on the East Asian monsoon and their mechanisms[J]. Chin J Atmos Sci,42(3):640-655(in Chinese).
- 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: 准定常行星波的作用[J]. 大气科学,30(5):863-870. Chen W, Kang L H,2006. Linkage between the Arctic Oscillation and winter climate over East Asia on the interannual timescale: roles of quasi-stationary planetary waves[J]. Chin J Atmos Sci,30(5):863-870(in Chinese).
- 陈文,兰晓青,王林,等,2013a. 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 W, Lan X Q, Wang L, et al,2013a. The combined effects of the ENSO and the Arctic Oscillation on the winter climate anomalies in East Asia[J]. Chin Sci Bull,58(12):1355-1362(in Chinese).
- 陈文,魏科,王林,等,2013b. 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,2013b. 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,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 Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al,2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming[J]. Acta Meteor Sin,66(5):808-825(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).
- 黄荣辉,陈文,魏科,等,2018. 平流层大气动力学及其与对流层大气相互作用的研究:进展与问题[J]. 大气科学,42(3):463-487. Huang R H, Chen W, Wei K, et al,2018. Atmospheric dynamics in the stratosphere and its interaction with tropospheric processes: progress and problems[J]. Chin J Atmos Sci,42(3):463-487(in Chinese).
- 黄荣辉,刘永,皇甫静亮,等,2014. 20 世纪 90 年代末东亚冬季风年代际变化特征及其内动力成因[J]. 大气科学,38(4):627-644. Huang R H, Liu Y, Huangfu J L, et al,2014. Characteristics and internal dynamical causes of the interdecadal variability of East Asian winter Monsoon near the late 1990s[J]. Chin J Atmos Sci,38(4):627-644(in Chinese).
- 李崇银,顾薇,2010. 2008 年 1 月乌拉尔阻塞高压异常活动的分析研究[J]. 大气科学,34(5):865-874. Li C Y, Gu W,2010. An analyzing study of the anomalous activity of blocking high over the Ural mountains in January 2008[J]. Chin J Atmos Sci,34(5):865-874(in Chinese).
- 李崇银,穆明权,2000. 东亚冬季风-暖池状况-ENSO 循环的关系[J]. 科学通报,45(7):678-685. Li C Y, Mu M Q,2000. Relationship between East Asian winter monsoon, warm pool situation and ENSO cycle[J]. Chin Sci Bull,45(16):1448-1455(in Chinese).
- 吕达仁,卞建春,陈洪滨,等,2009. 平流层大气过程研究的前沿与重要性[J]. 地球科学进展,24(3):221-228. Lü D R, Bian J C, Chen H B, et al,2009. Frontiers and significance of research on stratospheric processes[J]. Adv Earth Sci,24(3):221-228(in Chinese).
- 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 D, Ma L J, Wang P L, et al,2016. Anomalous activity of Arctic Oscillation in winter 2015/2016 and its impact on temperature in China[J]. Meteor Mon,42(7):892-897(in Chinese).
- 宋文玲,袁媛,2017. 强厄尔尼诺背景下 2015/2016 年冬季气候预测的不确定性分析[J]. 气象,43(10):1249-1258. Song W L, Yuan Y,2017. Uncertainty analysis of climate prediction for the 2015/2016 winter under the background of super El Niño event[J]. Meteor Mon,43(10):1249-1258(in Chinese).
- 王东阡,崔童,司东,等,2015. 2014/2015 年东亚冬季风活动特征及其可能成因分析[J]. 气象,41(7):907-914. Wang D Q, Cui T, Si D, et al,2015. Features and possible causes for East Asian winter monsoon in 2014/2015[J]. Meteor Mon,41(7):907-914(in Chinese).
- 王遵娅,司东,段丽瑶,2017. 冷空气过程监测指标[M]. 北京:气象出版社. Wang Z Y, Si D, Duan L Y,2017. Monitoring Indices of Cold Air Processes[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 武炳义,2018. 北极海冰融化影响东亚冬季天气和气候的研究进展以及学术争论焦点问题[J]. 大气科学,42(4):786-805. Wu B Y,2018. Progresses in the impact study of Arctic sea ice loss on winter-time weather and climate variability over East Asia and key academic disputes[J]. Chin J Atmos Sci,42(4):786-805(in Chinese).
- 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 B Y, Huang R H, Gao D Y,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]. Chin J Atmos Sci,23(3):267-275(in Chinese).
- 袁媛,李崇银,杨崧,2014. 与厄尔尼诺和拉尼娜相联系的中国南方冬季降水的年代际异常特征[J]. 气象学报,72(2):237-255. Yuan Y,

- Li C Y, Yang S, 2014. Decadal anomalies of winter precipitation over southern China in association with El Niño and La Niña[J]. *Acta Meteor Sin*, 72(2): 237-255 (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).
- 赵俊虎, 宋文玲, 柯宗建, 2020. 2019/2020 年冬季我国暖湿气候特征及成因分析[J]. *气象*, 46(7): 982-993. Zhao J H, Song W L, Ke Z J, 2020. Characteristics and causes analysis of the warm and wet winter in China in 2019/2020 [J]. *Meteor Mon*, 46(7): 982-993 (in Chinese).
- 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).
- 朱乾根, 1990. 我国的东亚冬季风研究[J]. *气象*, 16(1): 3-10. Zhu Q G, 1990. A review of studies on East Asia winter monsoon in China [J]. *Meteor Mon*, 16(1): 3-10 (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).
- Baldwin M P, Thompson D W J, 2009. A critical comparison of stratosphere-troposphere coupling indices [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 135(644): 1661-1672.
- Charlton A J, Polvani L M, 2007. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: climatology and modeling benchmarks [J]. *J Climate*, 20(3): 449-469.
- Chen Z, Wu R G, Wang Z B, 2019. Impacts of summer North Atlantic sea surface temperature anomalies on the East Asian winter monsoon variability [J]. *J Climate*, 32(19): 6513-6532, doi: 10.1175/JCLI-D-19-0061.1.
- Cohen J, Screen J A, Furtado J C, et al, 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather [J]. *Nat Geosci*, 7(9): 627-637.
- Dai A G, Fyfe J C, Xie S P, et al, 2015. Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability [J]. *Nat Climate Change*, 5(6): 555-559, doi: 10.1038/nclimate2605.
- Huang B Y, Thorne P W, Banzon V F, et al, 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons [J]. *J Climate*, 30(20): 8179-8205.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3): 437-472.
- Kidston J, Scaife A A, Hardiman S C, et al, 2015. Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather [J]. *Nat Geosci*, 8(6): 433-440.
- Luo D H, Xiao Y Q, Diao Y N, et al, 2016a. Impact of Ural blocking on winter warm Arctic-cold Eurasian anomalies. Part II: the link to the North Atlantic Oscillation [J]. *J Climate*, 29(11): 3949-3971.
- Luo D H, Xiao Y Q, Yao Y, et al, 2016b. Impact of Ural blocking on winter warm Arctic-cold Eurasian anomalies. Part I: blocking-induced amplification [J]. *J Climate*, 29(1): 3925-3947.
- Luo D H, Yao Y, Dai A G, et al, 2017. Increased quasi stationarity and persistence of winter Ural blocking and Eurasian extreme cold events in response to arctic warming. Part II: a theoretical explanation [J]. *J Climate*, 30(10): 3569-3587.
- Parkinson C L, 2014. Global sea ice coverage from satellite data: annual cycle and 35-Yr Trends [J]. *J Climate*, 27(24): 9377-9382.
- Reynolds R W, Smith T M, Liu C Y, et al, 2007. Daily high-resolution-blended analysis for sea surface temperature [J]. *J Climate*, 20(22): 5473-5496.
- Sato K, Inoue J, Watanabe M, 2014. Influence of the Gulf Stream on the Barents Sea ice retreat and Eurasian coldness during early winter [J]. *Environ Res Lett*, 9(8): 084009.
- Shi J, Qian W H, 2018. Asymmetry of two types of ENSO in the transition between the East Asian winter monsoon and the ensuing summer monsoon [J]. *Climate Dyn*, 51(9): 3907-3926.
- Wang B, Wu R G, Fu X H, 2000. Pacific-East Asian teleconnection; how does ENSO affect East Asian climate [J]. *J Climate*, 13(9): 1517-1536.
- Wang B, Zhang Q, 2002. Pacific-East Asian teleconnection. Part II: how the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño development [J]. *J Climate*, 15(22): 3252-3265.
- Wang L, Chen W, 2014. The East Asian winter monsoon: re-amplification in the mid-2000s [J]. *Chin Sci Bull*, 59(4): 430-436.
- Wen C, Graf H F, Huang R H, 2000. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon [J]. *Adv Atmos Sci*, 17(1): 48-60.
- 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.
- Wu B Y, Wang J, 2002. Winter Arctic Oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon [J]. *Geophys Res Lett*, 29(19): 1897.
- Wu B Y, Yang K, Francis J A, 2016. Summer Arctic dipole wind pattern affects the winter Siberian high [J]. *Int J Climatol*, 36(13): 4187-4201, doi: 10.1002/joc.462.
- Yao Y, Luo D H, Dai A G, et al, 2017. Increased quasi stationarity and persistence of Ural blocking and Eurasian extreme cold events in response to Arctic warming. Part I: Insights from observational analyses [J]. *J Climate*, 30(10): 3549-3568.
- Zhang R H, Akimasa S, Masahide K, 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(1): 49-62.
- Zhang Y, Sperber K R, Boyle J S, 1997. Climatology 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.
- Zheng F, Yuan Y, Ding Y H, et al, 2021. The 2020/21 extremely cold winter in China influenced by the synergistic effect of La Niña and warm Arctic [J]. *Adv Atmos Sci*.