

章大全,刘芸芸,2024. 2023/2024 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,50(7):887-896. Zhang D Q, Liu Y Y, 2024. Characteristics of atmospheric circulation in Northern Hemisphere in the 2023/2024 winter and its impact on weather and climate of China[J]. Meteor Mon, 50(7):887-896(in Chinese).

2023/2024 年冬季北半球大气环流特征 及对我国天气气候的影响*

章大全^{1,2} 刘芸芸^{1,2}

1 中国气象局气候研究重点开放实验室,国家气候中心,北京 100081

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

提 要: 利用国家气象信息中心整编发布的中国台站观测资料和全球大气再分析资料,分析了 2023/2024 年冬季我国气候异常特征和可能成因。2023/2024 年冬季,全国平均气温较常年同期偏高 0.3℃,气温冷暖起伏大,总体呈现“前冬暖、后冬冷”的季节内变化特征。全国平均降水量较常年同期偏多 19.8%,中东部大部地区降水偏多。东亚冬季风和西伯利亚高压强度接近常年,东亚槽偏弱。欧亚中高纬 500 hPa 位势高度场呈西低东高的分布形势,并具有显著的阶段性变化特征,2023 年 12 月和 2024 年 1 月以纬向环流为主,2 月转为异常经向型环流,有利于中高纬冷空气南下入侵我国。受赤道中东太平洋厄尔尼诺、热带印度洋和大西洋海温异常偏暖以及北太平洋年代际涛动负位相等因子的协同影响,冬季西太平洋副热带高压偏强、偏西,菲律宾及南海上空异常反气旋阶段性活跃,欧亚对流层高层出现沿西风急流传播的波列,有利于热带水汽向我国中东部输送,配合中高纬冷空气南下,导致该地区发生多次大范围雨雪冰冻天气过程。

关键词: 东亚冬季风,冷空气,厄尔尼诺,西太平洋副热带高压,季节内变化

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.052201

Characteristics of Atmospheric Circulation in Northern Hemisphere in the 2023/2024 Winter and Its Impact on Weather and Climate of China

ZHANG Daquan^{1,2} LIU Yunyun^{1,2}

1 Key Laboratory for Climate Studies, National Climate Centre, CMA, Beijing 100081

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Based on the observational datasets from National Meteorological Information Centre, and NCEP/NCAR reanalysis data, characteristics of spatio-temporal distribution of climate anomalies in the winter of 2023/2024 and possible causes and mechanisms are analyzed. During the 2023/2024 winter, average temperature in China was 0.3℃ higher than climatology. The fluctuation of temperature was significant, with an intra-seasonal variation feature of being warmer in the early winter but colder in the late winter. Average precipitation was more than normal by 19.8%, and most parts of central and eastern China received more precipitation above normal. The power of East Asian winter monsoon and the intensity of

* 国家自然科学基金项目(42175047,41975091)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J004,CXFZ2024J048)、安徽省自然科学基金江淮气象联合基金项目(2208085UQ10)、贵州新气象科技有限责任公司“揭榜挂帅”项目(2024-N69)、中国长江电力股份有限公司科研项目(2423020054)和中国气象局智能网格气候预测创新团队(CMA2024QN06)共同资助

2024 年 4 月 18 日收稿; 2024 年 5 月 28 日收修定稿

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

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

Siberian high were near the normal values, and the East Asian trough was in a weakened condition. 500 hPa geopotential height in the middle and high latitudes of Eurasia was low in the west but high in the east, featured with significant intra-seasonal fluctuation. Zonal atmospheric circulation prevailed in December 2023 and January 2024, and then it turned into abnormal meridional patterns in February 2024, which was favorable for the southward invasion of cold air in middle and high latitudes into China. In response to the synergistic effect of El Niño mature phase, warm tropical Indian Ocean and Atlantic Ocean, cold phase of Pacific interdecadal oscillation, an anomalous anticyclone was formed in the western North Pacific, being active over the Philippines and the South China Sea in stages. Western Pacific subtropical high intensified and extended westward. A Rossby wave train propagated along westerly jet in the upper troposphere, which was beneficial for the water vapor transport into central and eastern China. Finally, the confluence of this warm-moist air and the southward cold air from the middle and high latitudes led to the frequent snow and rain processes in the central and eastern parts of China.

Key words: East Asian winter monsoon, cold air, El Niño, western Pacific subtropical high, intra-seasonal variation

引 言

东亚冬季风是北半球冬季最活跃的大气环流系统之一,对中国乃至整个东亚地区的冬季气候异常有重要影响(丁一汇,2013;丁一汇等,2014)。东亚冬季风偏强时,西伯利亚高压和阿留申低压偏强,东亚大槽加深,对流层高层副热带西风急流加强,引导极地冷空气南下,影响我国除青藏高原以外的大部分地区,往往会导致极端天气气候事件的发生,如强降温、强降雪、霜冻等(郭其蕴,1994;高辉,2007;陈文等,2013)。

东亚冬季风系统受到多因子的影响和控制,既有太平洋、印度洋和大西洋海温异常,以及北极海冰和积雪等外强迫信号,也包括极涡、欧亚阻塞高压、东亚槽、西伯利亚高压、西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)、印缅槽等大气环流因子。其中,厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)作为热带海气系统季节到年际尺度的最强信号,对东亚冬季风和我国冬季气候有显著影响(Li, 1989; Webster and Yang, 1992; 穆明权, 2001; 陈文, 2002; 陶诗言和张庆云, 2012; 袁媛等, 2014; Ma and Chen, 2023; Liu et al, 2024)。在厄尔尼诺盛期,西北太平洋上空对流层低层盛行反气旋式异常环流,东亚沿岸以偏南风距平为主,东亚冬季风往往偏弱(Zhang et al, 1996; Wang et al, 2000; Liu et al, 2013; Kim et al, 2017)。另一方面,ENSO对东亚冬季风的影响还受到北太

平洋年代际涛动(PDO)和大西洋多年代际涛动(AMO)等的调制作用。在PDO负位相和AMO正位相年份,ENSO对东亚冬季风的影响通常更为显著(Wang et al, 2008; Geng et al, 2017; Shi, 2021)。PDO在20世纪70年代由负位相转为正位相,ENSO和东亚冬季风的关系也经历了年代际减弱(Wang and He, 2012)。此外,ENSO对东亚冬季风影响的减弱还可能与ENSO空间形态的演变,即21世纪以来中部型厄尔尼诺事件明显增多有关(Feng et al, 2010; Jia et al, 2020; Cai et al, 2021; Shin et al, 2022)。秋冬季北极海冰、北大西洋海温异常等外强迫信号激发的中高纬度大气遥相关及其与热带海气系统的协同作用,对东亚冬季风和我国气候也有重要影响(Wu et al, 2015; 李崇银和顾薇, 2010; Chen et al, 2019)。

随着全球变暖,我国冬季极端低温总体呈减少趋势,但近二十年来,我国极端冷事件的发生频率却明显增加,尤其是最近几个冬季均出现了严重的极端寒潮事件,冬季气候预测的难度也随之不断增大。近年来国家气候中心每年都及时开展冬季气候异常特征分析和成因诊断工作(支蓉和郑志海, 2022; 李想和王永光, 2023),本文回顾了2023/2024年冬季气温、降水异常分布特征和冷空气过程,重点从东亚冬季风主要环流系统的季节和次季节尺度演变特征,以及ENSO等外强迫因子的角度进行成因分析,以期揭示2023/2024年冬季气候异常的形成机制,为提升我国冬季气候预测准确率提供参考。

1 资料和方法

本文使用资料:国家气象信息中心整编的“中国地面气象要素日值数据集”,包括中国2400多个国家级地面气象站1951年以来的逐日气温和降水量观测数据(任芝花等,2012),并利用逐日数据计算得到逐月和季节平均数据;大气再分析数据源自美国国家环境预报中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)(Kalnay et al,1996),水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,垂直为17层;美国国家海洋与大气管理局(NOAA)发布的全球最优插值逐月海温资料(Reynolds et al,2017),水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

本文采用的东亚冬季风强度指数定义为($25^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$ 、 $80^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$)与($50^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$ 、 $80^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$)范围内500 hPa纬向风平均值的差值,并对差值进行标准化处理(朱艳峰,2008)。西伯利亚高压强度指数定义为($40^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$ 、 $80^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$)范围内海平面气压的面积加权平均值。西太副高各项特征指数采用刘芸芸等(2012)定义的指标。

文中部分图形和环流指数由国家气候中心开发的“气候与气候变化监测预测系统”和“气象灾害影响评估系统”生成。如无特别说明,文中冬季指上一年12月至当年2月,如2023/2024年冬季为2023年12月至2024年2月。气候常年值为1991—2020年的平均值。

2 2023/2024年冬季我国气候异常特征

2.1 气温异常特征

2023/2024年冬季,全国平均气温为 -2.8°C ,较常年同期(-3.1°C)偏高 0.3°C (图1a)。从全国冬季气温距平空间分布来看,华北东部、内蒙古东部、华东北部、华中北部部分地区气温偏低 $0.5 \sim 2.0^{\circ} \text{C}$,其中内蒙古东北部局部偏低 $2 \sim 4^{\circ} \text{C}$;全国其余大部地区气温接近常年或偏高,其中华南西部和南部、西南地区南部、新疆西部等地偏高 $1 \sim 4^{\circ} \text{C}$ (图1b)。

2023/2024年冬季气温起伏大,总体呈现“前冬暖、后冬冷”的季节内变化特征。冬季3个月的全国

月平均气温分别为 -2.7 、 -3.8 和 -3.9°C ,其中2023年12月和2024年1月分别较常年同期偏高 0.3°C 和 1.0°C ,2月偏低 0.9°C 。从空间分布看,2023年12月,我国东部地区气温距平呈“北低南高”分布,西部地区以偏高为主(图2a);2024年1月,除西南地区西部、西藏中东部等地气温较常年同期偏低外,全国其余大部地区气温明显偏高(图2b);2月全国大部地区气温转为较常年偏低(图2c)。全国平均气温距平剧烈波动,冷暖起伏大(图2d)。逐旬来看,2023年12月上旬平均气温偏高 2.9°C ,排名1961年以来历史同期第二高;中旬受寒潮天气影响,平均气温偏低 2.1°C ;2024年1月中旬偏高 3.0°C ,为历史同期第二高;1月下旬至2月上旬气温再次降至较常年偏低;2月中旬平均偏高 2.3°C ,下旬转为偏低 3.4°C 。全国有274个国家级气象站日最低气温达到极端事件监测标准,其中山西云州(-33.2°C)、内蒙古岗子(-32.4°C)等15个站突破当地历史极值。全国有265个国家级气象站日降温幅度达到极端事件监测标准,其中甘肃马鬃山(20.1°C)、新疆天山大西沟(20.1°C)等44个站突破当地历史极值(刘远等,2024)。

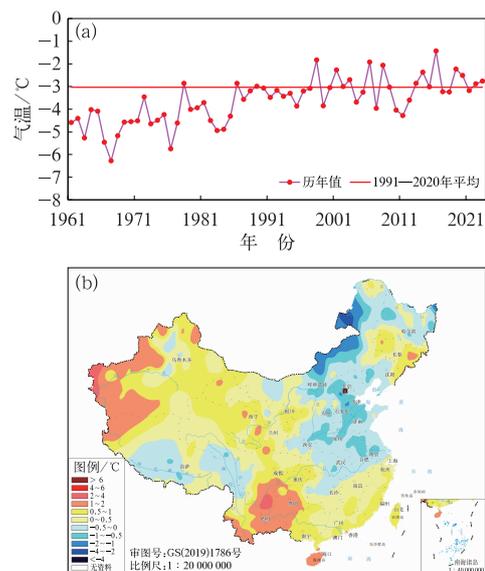


图1 (a)1961/1962—2023/2024年冬季全国平均气温变化,(b)2023/2024年冬季全国平均气温距平分布

Fig.1 (a) Interannual variation of mean temperature over China from 1961/1962 winter to 2023/2024 winter and (b) spatial distribution of mean temperature anomaly over China in the 2023/2024 winter

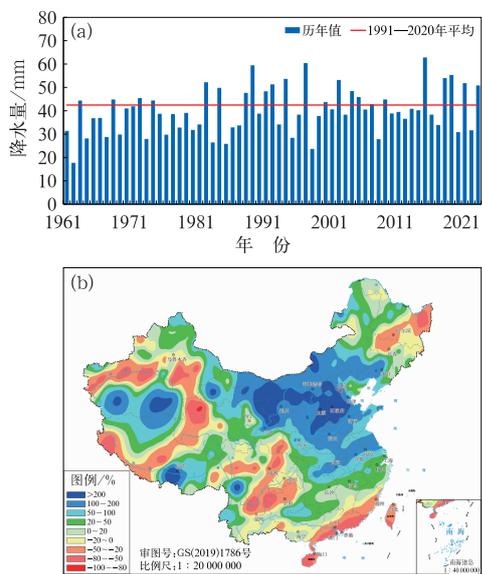


图 3 (a)1961/1962—2023/2024 年冬季全国平均降水量变化, (b)2023/2024 年冬季全国降水量距平百分率分布

Fig. 3 (a) Interannual variation of mean precipitation over China from 1961/1962 winter to 2023/2024 winter and (b) spatial distribution of precipitation anomaly percentage over China in the 2023/2024 winter

水量偏多 5 成至 2 倍,局部偏多 2 倍以上;全国其余地区降水较常年偏少,其中东北东部局部、华南东部和南部、西南地区中部、西北地区西部局部、新疆中部部分地区偏少 5 成以上(图 3b)。

2023 年 12 月,全国平均降水量为 12.0 mm,较常年(11.9 mm)偏多 0.8%;中东部地区降水距平呈“北多南少”空间分布,其中华北中部、东北西南部、华东大部、华中北部地区降水较常年同期偏多 2 倍以上(图 4a)。2024 年 1 月,全国平均降水量为 16.3 mm,较常年同期(14.4 mm)偏多 13.2%;内蒙古中部、华中中部和南部、华南北部、西南地区东北部等地降水较常年同期偏多 1 倍以上(图 4b)。2 月,全国平均降水量为 22.5 mm,较常年同期(16.3 mm)偏多 38.0%;除东北中东部、华南南部、西南地区中东部和新疆北部部分地区外,其余大部地区降水较常年偏多(图 4c)。

3 2023/2024 年冬季北半球大气环流及东亚冬季风活动特征

3.1 北半球大气环流背景及其季节内变化

2023/2024 年冬季,北极涛动(AO)强度接近常

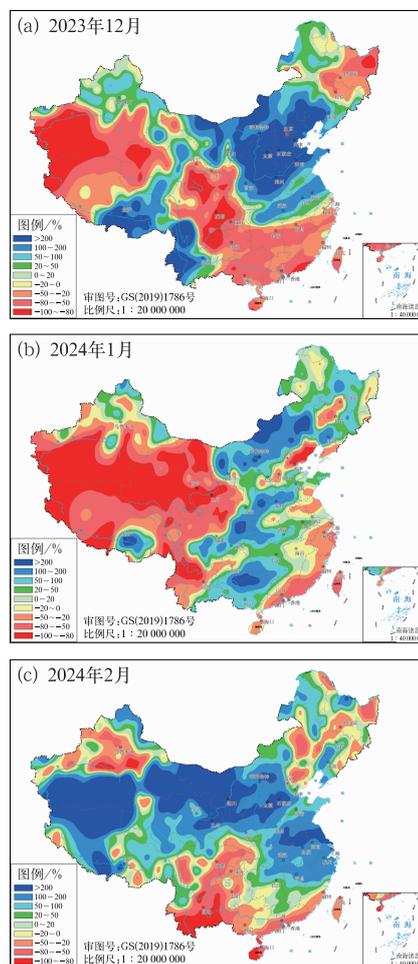
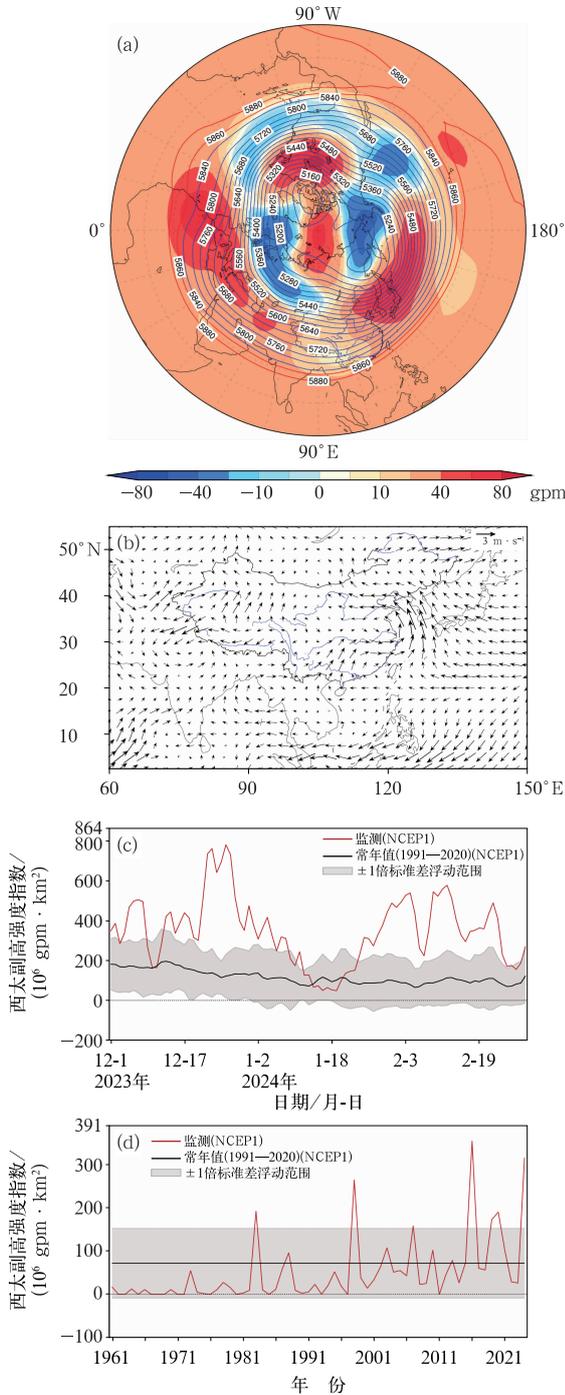


图 4 2023/2024 年冬季全国逐月降水量距平百分率分布

Fig. 4 Spatial distribution of monthly precipitation anomaly percentage over China in the 2023/2024 winter

年,其中,2023 年 12 月和 2024 年 1 月为负位相,2 月转为正位相。欧亚大陆中高纬 500 hPa 位势高度场呈“西低东高”的分布形势,贝加尔湖以西到欧洲为高度场负距平控制,贝加尔湖以东到日本海上空为高度场正距平,对应东亚槽强度偏弱;我国大部地区为高度场正距平控制,热带和副热带上空高度场以正距平为主(图 5a)。

在低层距平风场上,2023/2024 年冬季南海北部至我国南方上空为反气旋式环流异常,同时日本海上空也为反气旋式环流异常,东海和南海上空盛行偏南风 and 偏东风,有利于热带和副热带水汽向我国中东部地区输送;孟加拉湾北部为反气旋式环流异常,对应印缅槽偏弱(图 5b)。冬季大部分时段西太副高强度偏强(图 5c),面积偏大,西伸脊点位置偏



注:图 a 中红色等值线表示气候平均的 5860 gpm 和 5880 gpm 线。

图 5 2023/2024 年冬季(a)北半球 500 hPa 位势高度场(等值线,单位:gpm)及距平场(填色), (b)850 hPa 风场距平, (c,d)西太副高强度指数(c)逐日演变和(d)历年变化

Fig. 5 (a) 500 hPa geopotential height (contour, unit: gpm) and anomaly (colored) in the Northern Hemisphere, (b) 850 hPa horizontal wind anomaly, (c) daily and (d) interannual variations of western Pacific subtropical high intensity index in the 2023/2024 winter

西,脊线位置 12 月偏北、1 月偏南、2 月偏北,北界位置偏北;其面积和强度指数(图 5d)均排名 1961 年以来历史第二。

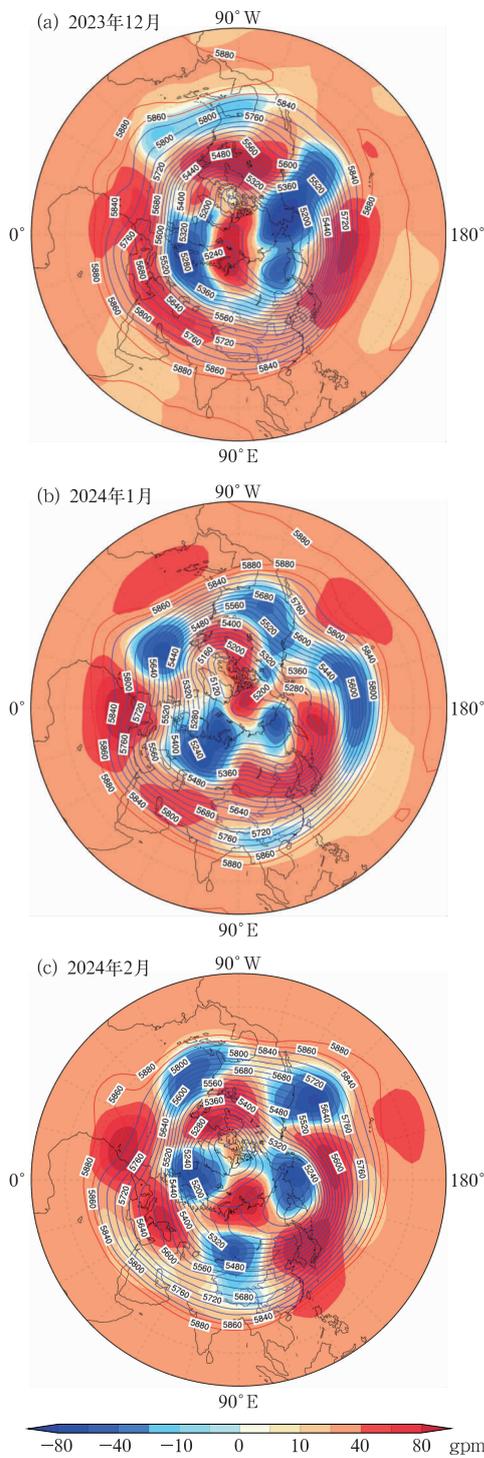
2023/2024 年冬季欧亚中高纬大气环流呈现出显著的季节内变化特征。2023 年 12 月(图 6a), 500 hPa 位势高度场上新地岛至北极地区为正距平,欧洲北部至贝加尔湖上空为负距平,我国大部为正距平控制,有利于气温偏高。但 12 月中旬乌拉尔山阻塞高压阶段性增强,贝加尔湖以南低槽加深,引导极地冷空气南下影响我国,导致中东部地区出现暖冷转折,叠加雨雪天气过程,使得华北和黄淮等地气温持续偏低。12 月 11—24 日,北京气温在 0℃ 以下的低温时长累计超过 300 h,这是 1951 年以来北京 12 月最长连续低温过程。2024 年 1 月,欧亚中高纬 500 hPa 位势高度距平场转为“西低东高”型分布,乌拉尔山附近上空为负距平,阻塞高压不活跃,巴尔喀什湖以东为正距平,影响我国的冷空气强度总体偏弱(图 6b),因此,除西南地区西部、西藏中东部等地外,全国其余地区气温明显偏高。2 月,欧亚中高纬环流经向度加大,500 hPa 位势高度距平场呈“两脊一槽”型分布,乌拉尔山上空高度场为正距平,巴尔喀什湖至贝加尔湖为低槽,日本海上空为暖高压中心(图 6c)。这种环流形势有利于冷空气南下影响我国,导致 2 月气温较常年明显偏低。

3.2 东亚冬季风活动特征

2023/2024 年冬季,东亚冬季风和西伯利亚高压强度均接近常年(图 7a,7c),但季节内变化显著,与我国冬季气温的阶段变化特征一致。2023 年 12 月上旬,东亚冬季风和西伯利亚高压强度均偏弱,我国大部地区气温明显偏高。进入 12 月中旬,欧亚中高纬度环流形势发生调整,东亚冬季风和西伯利亚高压同时加强(图 7b,7d),强寒潮南下影响我国,导致中东部大部气温明显下降。12 月中旬、2024 年 1 月下旬至 2 月上旬和 2 月下旬 3 次东亚冬季风和西伯利亚高压显著增强时段,分别对应我国 3 次寒潮天气过程(2023 年 12 月 14—17 日、2024 年 1 月 19—23 日、2024 年 2 月 18—23 日)(表 1)。

4 2023/2024 年冬季我国东部降水异常偏多成因分析

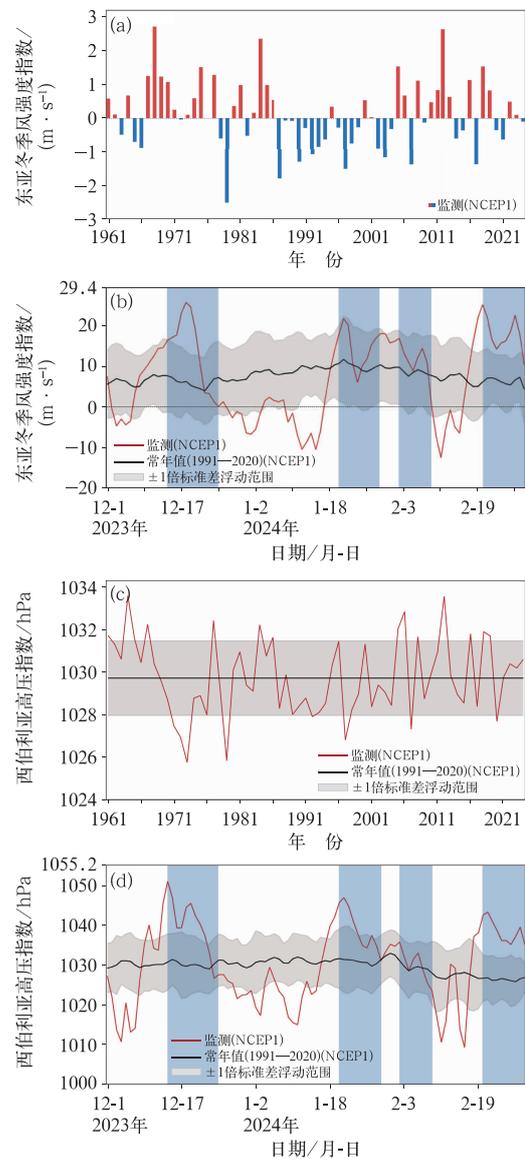
研究表明,在厄尔尼诺事件成熟位相的冬季,西



注:红色等值线表示气候平均的 5860 gpm 和 5880 gpm 线。

图 6 2023/2024 年冬季逐月北半球 500 hPa 位势高度场(等值线,单位:gpm)及距平场(填色)
Fig.6 Monthly geopotential height at 500 hPa (contour, unit: gpm) and anomaly (colored) in the Northern Hemisphere in the 2023/2024 winter

北太平洋上空通常盛行反气旋式异常环流,导致东



注:图 b.d 中蓝色阴影为全国平均气温负距平时段。

图 7 (a,b)东亚冬季风强度指数和(c,d)西伯利亚高压强度指数的(a,c)历年变化和 (b,d)2023/2024 年冬季逐日变化

Fig.7 (a, c) Interannual variation and (b, d) daily variation of (a, b) East Asia winter monsoon intensity index and (c, d) Siberian high intensity index in the 2023/2024 winter

亚冬季风偏弱,有利于我国大部气温偏高为主,南方地区降水偏多(Li, 1990; Zhang et al, 1996; Wang et al, 2000; Liu et al, 2024)。另一方面,西太平洋暖池和热带大西洋海温偏高,也有利于激发西北太平洋反气旋,加强西太副高和我国南方地区水汽输送(He et al, 2015)。

2023 年 5 月至今,赤道中东太平洋发生了一次中等强度的东部型厄尔尼诺事件(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会,2017)。此次厄尔尼诺事件的峰值出现在 2023 年 12 月(图 8a),Niño3.4 指数(3 个月滑动平均)达到 1.9°C 。此外,热带印度洋海表温度持续偏高,2023/2024 年冬季印度洋全区海温一致模态指数达到 0.9°C ,强度为 1961 年以来历史第一;西太平洋暖池和热带北大西洋海表温度均偏高(图 8b),其中热带北大西洋海温指数达到 1.1°C ,强度为 1961 年以来历史第一。2023/2024 年冬季,除东北北部、华东南部和华南东部等地外,我国中东部地区降水总体偏多,其中华北中部、内蒙古中西部部分地区偏多 2 倍以上(图 3b)。与典型的东部型厄尔尼诺年合成的降水异常分布相比,2023/2024 年冬季我国中东部地区降水偏多中心的位置明显偏北。这说明 2023/2024 年冬季东亚地区环流及我国降水异常不仅仅受到东部型厄尔尼诺事件的影响。

有研究指出,厄尔尼诺对东亚冬季风的影响受到 PDO 的调制作用,在 PDO 负位相年份,ENSO 对冬季风的影响更为显著,这种不对称关系主要与西北太平洋反气旋和东亚沿岸距平风场有关(Wang et al,2008)。PDO 负位相背景下,西北太平洋反气旋西侧偏南风影响范围更广,对冬季风的削弱作用也更为明显。2023/2024 年冬季 PDO 处于负位相,指数为 -0.3 。东亚 850 hPa 距平风场上出现两个反气旋异常中心,分别位于南海北部和日本海(图 5b)。东海和黄海上空盛行偏南风距平,华北上空为偏东风距平。双反气旋的接力作用,有利于将热带和副热带地区水汽输送至我国北方地区,从而导致降水异常偏多、中心更偏北。

此外,冬季欧亚对流层上层,沿着副热带西风急流传播的罗斯贝波列与西太副高的协同作用,可导致西太副高脊线位置偏北,将源自孟加拉湾及南海上空的丰沛水汽输送至我国长江流域及以北地区(Zhang and Chen,2021)。2023/2024 年冬季,在 200 hPa 距平风场上,从副热带北大西洋到东亚上空呈明显的波列分布,经向风的正距平中心分别位于副热带北大西洋、阿拉伯半岛和我国东部地区上空,有利于将热带地区充沛的水汽输送至我国中东部地区(图 9)。配合多次源自中高纬的冷空气南下进入我国,与暖湿气流交汇,导致冬季我国东部偏北的大部地区多次出现大范围雨雪冰冻天气过程。

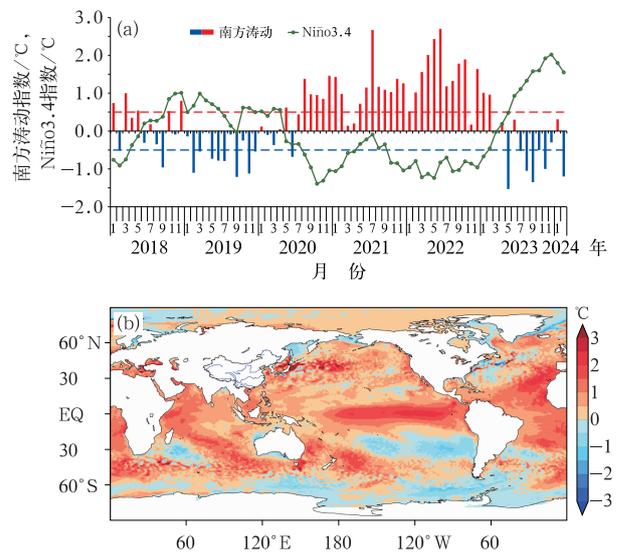


图 8 (a)2018 年 1 月至 2024 年 2 月逐月 Niño3.4 和南方涛动指数及(b)2023/2024 年冬季海表温度距平分布

Fig. 8 (a) Monthly Niño3.4 index and standardized Southern Oscillation index from January 2018 to February 2024 and (b) spatial distribution of sea surface temperature anomaly in the 2023/2024 winter

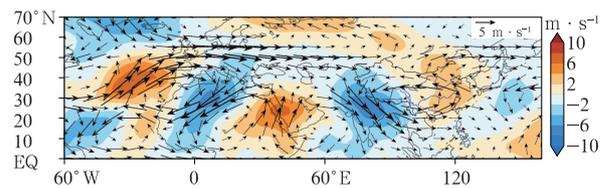


图 9 2023/2024 年冬季 200 hPa 风场距平(风矢)和经向风距平(填色)

Fig. 9 (a) 200 hPa horizontal wind anomaly (wind vector) and meridional wind anomaly (colored) in the 2023/2024 winter

5 结论与讨论

本文利用站点观测资料和大气再分析资料,分析了 2023/2024 年冬季我国气候异常特征和大尺度环流背景异常以及东亚冬季风活动特征,讨论了热带和中高纬系统对我国冬季气候异常的协同影响。

2023/2024 年冬季,全国平均气温为 -2.8°C ,较常年同期偏高 0.3°C 。我国南方和西部地区气温较常年同期偏高,其中西南地区南部、新疆西部等地平均气温偏高 1°C 以上。冬季气温冷暖起伏大,总体呈现“前冬暖、后冬冷”的季节内变化特征。全国平均降水量为 50.8 mm ,较常年同期偏多 19.8% 。

除东北地区北部、华南东部等地外,我国中东部大部地区降水偏多,华北中部、内蒙古中西部等地偏多2倍以上。

2023/2024年冬季,赤道中东太平洋经历中等强度厄尔尼诺事件,热带印度洋和大西洋海温异常偏高,有利于西太副高偏强、偏西,菲律宾及南海上空的异常反气旋性环流阶段性活跃,将源自孟加拉湾及南海上空的丰沛的水汽输送至我国中东部地区。此外,PDO负位相和欧亚对流层高层沿西风急流传播的波列,有利于东亚沿岸盛行偏南风距平,水汽输送路径偏北。配合源自中高纬的冷空气南下,与暖湿气流交汇,导致我国中东部多次出现大范围的雨雪冰冻天气过程。另一方面,2023/2024年冬季我国平均气温较常年偏高,但是阶段性冷空气活动比较频繁,冷暖起伏大,这也与厄尔尼诺年冬季冷空气频次较之拉尼娜和中性状态下明显偏多的气候特征一致(Chen et al,2004;Zhang et al,2017)。

西北太平洋异常反气旋是厄尔尼诺影响东亚气候的关键桥梁。2023/2024年冬季,西北太平洋上空呈现异常反气旋式环流,体现出对厄尔尼诺事件的响应特征,但反气旋的位置偏北。研究表明,厄尔尼诺事件成熟位相的冬季,赤道中东太平洋和印度洋海表温度偏高,西太平洋暖池区海温通常偏低,有利于菲律宾附近出现异常反气旋环流且维持(Wang et al,2000)。而2023/2024年冬季,西太平洋暖池海温持续偏高,这可能是导致西北太平洋异常反气旋偏北的原因之一。因此,揭示西太平洋暖池增温趋势对关键热带海气物理过程的可能影响(Rao et al,2012;Weller et al,2016),准确把握厄尔尼诺与我国气候异常关系的变化,加深对厄尔尼诺影响复杂性的认识,具有重要的科学意义和应用价值。

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,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).
- 丁一汇,柳艳菊,梁苏洁,等,2014. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系[J]. 气象学报, 72(5): 835-852. Ding Y H, Liu Y J, Liang S J, et al, 2014. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change[J]. Acta Meteor Sin, 72(5): 835-852(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]. Quart J Appl Meteor, 5(2): 218-225(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).
- 李想,王永光,2023. 2022/2023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, 49(7): 881-891. Li X, Wang Y G, 2023. Atmospheric circulation characteristics of Northern Hemisphere in winter 2022/2023 and its impact on weather and climate of China[J]. Meteor Mon, 49(7): 881-891(in Chinese).
- 刘远,乔琦,郭艳君,2024. 2023/2024年冬季全国气候影响评价[R]. 国家气候中心: 1-10. Liu Y, Qiao Q, Guo Y J, 2024. National climate impact assessment of 2023/2024 winter[R]. National Climate Centre: 1-10(in Chinese).
- 刘芸芸,李维京,艾祝秀,等,2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J]. 应用气象学报, 23(4): 414-423. Liu Y Y, Li W J, Ai W X, et al, 2012. Reconstruction and application of the monthly western Pacific subtropical high indices[J]. J Appl Meteor Sci, 23(4): 414-423(in Chinese).
- 穆明权,2001. 东亚冬季风异常与 ENSO 循环关系的进一步研究[J]. 气候与环境研究, 6(3): 273-285. Mu M Q, 2001. A further research on the cyclic relationship between anomalous East-Asian winter monsoon and ENSO[J]. Climatic Environ Res, 6(3): 273-285(in Chinese).
- 任芝花,余予,邹凤玲,等,2012. 部分地面要素历史基础气象资料质量检测[J]. 应用气象学报, 23(6): 739-747. Ren Z H, Yu Y, Zou F L, et al, 2012. Quality detection of surface historical basic meteorological data[J]. J Appl Meteor Sci, 23(6): 739-747(in Chinese).
- 陶诗言,张庆云,1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应[J]. 大气科学, 22(4): 399-407. Tao S Y, Zhang Q Y, 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events[J]. Sci Atmos Sin, 22(4): 399-407(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).
- 支蓉,郑志海,2022. 2021/2022年冬季中国气候异常特征及南方降

- 水异常偏多成因分析[J]. 气象, 48(7):925-935. Zhi R, Zheng Z H, 2022. Characteristics of climate anomalies over China in winter 2021/2022 and causes for precipitation anomalies over southern China[J]. Meteor Mon, 48(7):925-935(in Chinese).
- 中国气象局, 2018. 冷空气过程监测指标: QX/T 393—2017[S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2018. Monitoring indices of cold air processes: QX/T 393—2017[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2017. 厄尔尼诺/拉尼娜事件判别方法: GB/T 33666—2017[S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2017. Identification method for El Niño/La Niña: GB/T 33666—2017[S]. Beijing, Standards Press of China(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).
- Cai W J, Santoso A, Collins M, et al, 2021. Changing El Niño-Southern Oscillation in a warming climate[J]. Nat Rev Earth Environ, 2(9):628-644.
- Chen T C, Huang W R, Yoon J H, 2004. Interannual variation of the East Asian cold surge activity[J]. J Climate, 17(2):401-413.
- 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.
- Feng J, Wang L, Chen W, et al, 2010. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter[J]. J Geophys Res: Atmos, 115(D24):D24122.
- Geng X, Zhang W J, Stuecker M F, et al, 2017. Decadal modulation of the ENSO-East Asian winter monsoon relationship by the Atlantic Multidecadal Oscillation[J]. Climate Dyn, 49(7/8):2531-2544.
- He C, Zhou T J, Wu B, 2015. The key oceanic regions responsible for the interannual variability of the western North Pacific subtropical high and associated mechanisms[J]. J Meteor Res, 29(4):562-575.
- Jia Z X, Bollasina M A, Li C F, et al, 2020. Changes in the relationship between ENSO and the East Asian winter monsoon under global warming[J]. Environ Res Lett, 15(12):124056.
- 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.
- Kim J W, An S I, Jun S Y, et al, 2017. ENSO and East Asian winter monsoon relationship modulation associated with the anomalous northwest Pacific anticyclone[J]. Climate Dyn, 49(4):1157-1179.
- Li C Y, 1989. Warmer winter in eastern China and El Niño[J]. Chin Sci Bull, 34(21):1801-1805.
- Li C Y, 1990. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events[J]. Adv Atmos Sci, 7(1):36-46.
- Liu Y Y, Ding Y H, Gao H, et al, 2013. Tropospheric biennial oscillation of the western Pacific subtropical high and its relationships with the tropical SST and atmospheric circulation anomalies[J]. Chin Sci Bull, 58(30):3664-3672.
- Liu Y Y, Hu Z Z, Wu R G, et al, 2024. Evolution of ENSO-related seasonal precipitation anomalies in East Asia: a robustness revisit[J]. Int J Climatol, 44(1):269-285.
- Ma T J, Chen W, 2023. Recent progress in understanding the interaction between ENSO and the East Asian winter monsoon: a review[J]. Front Earth Sci, 11:1098517.
- Rao S A, Dhakate A R, Saha S K, et al, 2012. Why is Indian Ocean warming consistently? [J]. Clim Change, 110(3/4):709-719.
- Reynolds R W, Smith T M, Liu C Y, et al, 2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature[J]. J Climate, 20(22):5473-5496.
- Shi J, 2021. Reexamining the decadal variation in the ENSO-East Asian winter monsoon relationship[J]. Geophys Res Lett, 48(19):e2021GL094208.
- Shin N Y, Kug J S, Stuecker M F, et al, 2022. More frequent central Pacific El Niño and stronger eastern Pacific El Niño in a warmer climate[J]. NPJ Clim Atmos Sci, 5(1):101.
- 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 H J, He S P, 2012. Weakening relationship between East Asian winter monsoon and ENSO after mid-1970s[J]. Chin Sci Bull, 57(27):3535-3540.
- 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.
- Webster P J, Yang S, 1992. Monsoon and ENSO: selectively interactive systems[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 118(507):877-926.
- Weller E, Min S K, Cai W J, et al, 2016. Human-caused Indo-Pacific warm pool expansion[J]. Sci Adv, 2(7):e1501719.
- 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.
- Zhang D Q, Chen L J, 2021. Possible mechanisms for persistent anomalous rainfall over the middle and lower reaches of Yangtze River in winter 2018/2019[J]. Int J Climatol, 41(14):6324-6335.
- Zhang R, Chen Z Y, Ou C Q, et al, 2017. Trends of heat waves and cold spells over 1951—2015 in Guangzhou, China[J]. Atmosphere, 8(2):37.
- 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(1):49-62.