

2024 年 2 月华东和华中大范围低温雨雪冰冻灾害的成因和可预报性分析*

赵俊虎¹, 赵语欣², 贾小龙^{1*}, 张涵³, 熊开国⁴, 曾宇星⁵

1 中国气象局气候预测研究重点开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

2 南京信息工程大学龙山书院, 南京 210044

3 中山大学大气科学学院, 珠海 519087

4 武汉区域气候中心, 武汉 430074

5 湖南省气候中心, 长沙 410000

摘要 利用全国 2374 个站点的逐日气温和降水资料、NCEP/NCAR 大气环流再分析资料和 Hadley 中心的海温资料, 研究了 2024 年 2 月华东和华中大范围低温雨雪冰冻灾害成因和可预报性。结果表明: 2024 年 2 月上旬和下旬华东和华中发生了两次大范围低温雨雪冰冻天气过程, 两次过程发生地区重叠度高, 冰雪灾害严重; 影响两次过程的副热带和中高纬环流系统配置较为一致, 西北太平洋副热带高压 (以下简称副高) 稳定偏强和偏西, 西伯利亚高压、南支槽和西北太平洋反气旋阶段性同步偏强, 形成较强的协同作用, 西伯利亚高压增强导致冷空气南下, 副高、南支槽和西北太平洋反气旋同步增强则为华东和华中提供了充沛的水汽条件; 2023 年 5 月至 2024 年 4 月赤道中东太平洋地区发生了一次中等强度的 El Niño 事件, 冬季热带印度洋和热带北大西洋海温异常偏暖, 三大洋海温异常共同导致了副高持续偏强, 也有利于西北太平洋反气旋的阶段性发展和增强, 为 2 月的两次过程提供了充沛的水汽条件; 次季节模式对两次过程的预报时效大约在 1~2 周左右, 起报时间在 2 周以上时, 模式无法准确预测欧亚中高纬环流系统的异常特征, 导致对两次过程的预测能力较低。

关键词 低温雨雪冻雨, El Niño, 成因, 次季节可预报性

Causes and predictability of the high-impact large-scale cryogenic freezing rain and snow weather in February 2024 in East and Central China

收稿日期: 2024-4-27;

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

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

资助信息: 国家重点研发计划 (2023YFC3007700)、国家自然科学基金项目 (42075017)、中国气象局创新发展专项 (CXFZ2023J002 和 CXFZ2024J023) 和湖北省自然科学基金 (2022CFD014) 共同资助

Zhao Junhu¹, Zhao Yuxin², Jia Xiaolong^{1*}, Zhang Han³, Zeng Yuxing⁴, Xiong Kaiguo⁵

1 China Meteorological Administration Key Laboratory for Climate Prediction Studies, National Climate Center, Beijing 100081, China

2 Longshan College, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

3 School of Atmospheric Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519087, China

4 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074, China

5 Hunan Climate Center, Changsha 410000, China

Abstract: The causes and predictability of the high-impact large-scale cryogenic freezing rain and snow weather (CFRSW) in east and central China in February 2024 were investigated using the daily temperature and precipitation data from 2,374 stations, the NCEP/NCAR atmospheric circulation reanalysis data and the HadISST data. The results show that: (1) Two CFRSW processes occurred in China in early and late February 2024, and the overlap of the regions was high. The east and central China suffered the most serious freezing rain and snow disaster. (2) The subtropical and mid-high latitude circulation system configuration that influenced the two CFRSW processes were more consistent, the western north Pacific subtropical high (WNPSH) was strong and westward. Siberian high, the South Branch trough and the western north Pacific anticyclone were strong in the same period, forming a strong synergistic effect. The enhancement of the Siberian high led to cold air southward, and the synchronization of the enhancement of South Branch trough and western north Pacific anticyclone to provide abundant water vapor conditions for the east and central China. (3) A moderate-intensity El Niño event occurred in the equatorial east-central Pacific from May 2023 to April 2024. In addition, the tropical Indian Ocean and the tropical North Atlantic were abnormally warm in winter. The abnormal SST of the three oceans jointly led to the continuous strength of the WNPSH. This is conducive to the periodic development and enhancement of the anticyclones in the Northwest Pacific Ocean, and provides abundant water vapor conditions for the two CFRSW processes in February. (4) The predictability of the sub-seasonal model for the two processes is about 1~2 weeks, and the prediction skill within 1 week is relatively high. When advanced by more than 2 weeks, the model is unable to accurately predict the anomalous characteristics of the Eurasian mid-high latitude circulation system, resulting in lower predictive ability for the two processes.

Keyword: freezing rain and snow weather, causes, El Niño, sub-seasonal predictability

引言

东亚冬季风是东亚气候系统的重要组成部分，对东亚冬季气候异常有重要影响。东亚冬季风起源于西伯利亚高压，其强度主要取决于西伯利亚高压的发展程度 (Ding and Krishnamurti, 1987; 龚道溢等, 2002; Chang and Lu, 2012)。西伯利亚高压和阿留申低压偏强时，东亚大槽加深，东亚冬季风偏强，易引发寒潮天气 (高辉, 2007; Wang et al, 2010; 陈文, 2002)。在强寒潮的影响下，有些年份冬季我国南方会发生低温、雨雪和冰冻天气。

历史上发生严重低温冰冻灾害的有 1954 年 12 月至 1955 年 1 月、1957 年 1-2 月、1964 年 2 月、1969 年 1-2 月、1977 年 1-2 月、1984 年 1 月等 (王凌等, 2008)。20 世纪 80 年代以来，全球变暖加剧，但严重的雨雪冰冻灾害还是时有发生，2005 年冬季，湖南、贵州发生了严重的冰冻灾害。2008 年 1 月中旬至 2 月上旬，我国南方大部地区遭受了历史罕见的大范围低温雨雪冰冻灾害，给南方的国民经济和人民生命财产造成了巨大损失 (丁一汇等, 2008)。许多学者研究了这次极端气候事件的成因，例如：王东海等 (2008) 和杨贵名等 (2008) 强调了北极涛动、乌拉尔山阻塞高压、南支槽、逆温层等的共同作用；高辉等 (2008) 和丁一汇等 (2008) 研究指出 La Niña 事件为雨雪冰冻天气提供了冷空气侵袭中国南方的前提条件。2020 年 12 月中旬到 2021 年 1 月上旬，三次寒潮横扫我国大部分地区，暖北极和 La Niña 的协同效应导致了此次中高纬大气环流的异常 (韩荣青等, 2021; Zheng et al, 2022)。2022 年 2 月下旬我国南方发生持续低温阴雨雪天气过程，对南方农业生产造成不利影响 (王璠等, 2022)。上述研究从天气、气候等角度揭示了冰雪灾害发生的成因、预测信号，为防灾减灾提供科学支撑，具有重要的科学意义。

2024 年 1 月末至 2 月上旬、2 月中旬末至下旬我国华东和华中地区再次发生了两次大范围低温雨雪冰冻天气，山东、河南、安徽、湖南、湖北、贵州及苏皖等地出现大范围冻雨 (许先煌和张芳华, 2024; 俞小鼎等, 2024)。其中前

一次过程被气象媒体称为 2009 年以来最强雨雪冰冻天气。低温雨雪冰冻灾害给农业生产、春运及电力传输等均带来严重的不利影响和经济损失。这两次大范围低温雨雪冰冻灾害时空特征如何，与东亚冬季风和副热带环流有何联系？El Niño 等外强迫因子对此次事件是否有影响？次季节模式的可预报性如何，即提前多长时间可以预测这两次雨雪冰冻天气？本文将针对上述问题开展分析。

1 资料

本文所用资料主要包括：

(1) 美国国家环境预报中心和国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 发布的全球逐月大气环流再分析资料，水平空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，垂直方向从1000~10 hPa共17层等压面 (Kalnay et al, 1996)，1978年之前再分析资料存在较大的系统性偏差 (Wu et al, 2005)，故本文选取1979年之后资料进行研究，气候值均取1991-2020年的30年平均值。海温（指海表温度，SST）资料来自Hadley中心 (HadISST, Reynolds et al, 2002)，水平空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

(2) 中国气象局国家气象信息中心整编发布的“中国地面基本气象要素日值数据集 (V3.0)”，包括2374个站点，选取降水量、平均气温、日最高气温、日最低气温等资料。

(3) Niño3.4指数、西北太平洋副热带高压（以下简称副高）指数来自国家气候中心 (http://cmdp.ncc-cma.net/Monitoring/cn_index_130.php [2024-03-10])。热带印度洋SST异常指数 (TIO) 和热带北大西洋SST异常指数 (TNA) 分别定义为区域 $15^{\circ} \text{S} \sim 15^{\circ} \text{N}$ 、 $40^{\circ} \text{E} \sim 120^{\circ} \text{E}$ 和区域 $0^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$ 、 $70^{\circ} \text{W} \sim 0^{\circ}$ 平均的海温距平。西伯利亚高压强度指数定义为 $40^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$ 、 $80^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$ 区域平均的海平面气压 (SLP)；东亚冬季风强度指数定义为区域 $25^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$ 、 $80^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$ 与区域 $50^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$ 、 $80^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$ 的500hPa纬向风面积加权平均值的差 (朱艳峰, 2008)；南支槽强度指数定义为 $17.5^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{N}$ 、 $80^{\circ} \sim 100^{\circ} \text{E}$ 区域平均的850hPa纬向风；东亚经向水汽输送强度指数定义为 $20^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}$ 、 $110^{\circ} \sim 130^{\circ} \text{E}$ 区域平均的850hPa经向风。上述指数均计算其距平后进行分析。

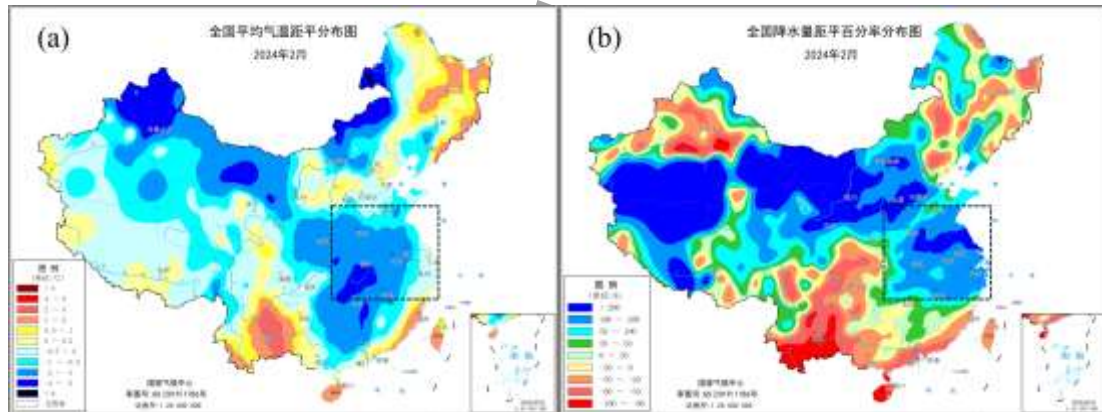
(4) 2024年2月我国低温冰冻雨雪灾害特征参考了中国气象局国家气候中心发布的《气候影响评价》。文中部分图形和海温指数出自国家气候中心开发的“气象灾害影响评估系统”和“气候与气候变化监测预测系统”。为了表述简洁起见，以下对2024年1月末至2月中国中东部地区的低温雨雪冰冻灾害简称为“2402冰雪灾害”。冬季指的

是上一年12月至当年2月。

(5) 动力气候模式资料来自美国国家环境预测中心的第二代气候预测系统 (CFSv2, Saha et al, 2014) 和欧洲中期天气预报中心模式 (ECMWF, Kim et al, 2012)。CFSv2的预报时效为第0~44d, 频率为1次/日, ECMWF的预报时效为第0~46d, 频率为2次/周, 水平空间分辨率均为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$, 将模式数据采用双线性插值方法插值到中国2374个站点, 然后利用空间距平相关系数 (ACC) 进行预测技巧评估。

2 “2402 冰雪灾害”特征

2024年2月, 全国平均气温为 -1.8°C , 较常年同期偏低 0.5°C 。全国大部地区气温较常年同期偏低, 其中华东西部、华中、华南北部等地偏低 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$, 湖北东南部、湖南北部等地偏低 2°C 以上 (图1a)。全国平均降水量 22.5mm , 较常年同期偏多 38% 。从空间分布看, 华北、华东大部、华中中部和北部、西北、西藏大部、新疆南部等地较常年同期偏多5成至2倍, 部分地区偏多2倍以上 (图1b)。



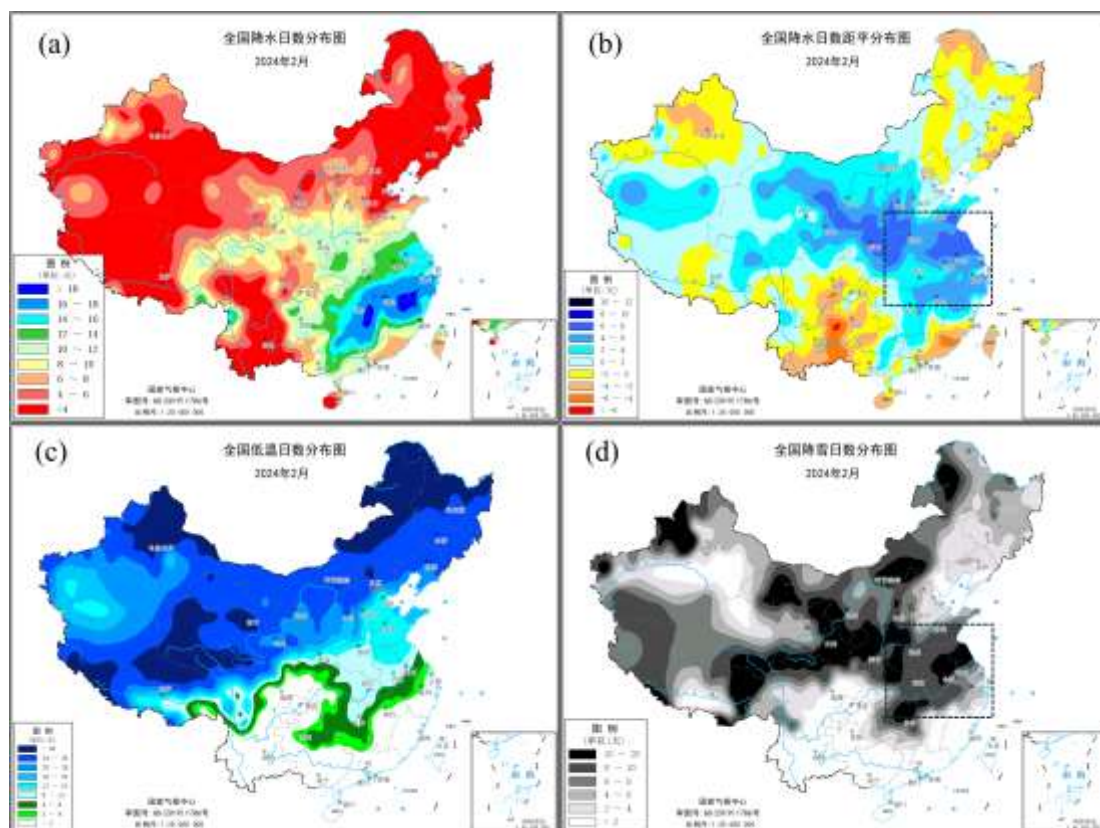
注: 黑色虚线方框区示意华东和华中区域 ($28^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$)。

图1 2024年2月全国平均 (a) 气温距平 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 (b) 降水距平百分率 (单位: %)

Figure 1. Monthly (a) temperature anomaly (unit: $^{\circ}\text{C}$) and (b) precipitation anomaly percentage (unit: %) in February 2024 in China

图2进一步给出了2024年2月全国降水日数 (日降水量 $>0.1\text{mm}$) 及距平、低温日数 (日平均气温 $<0^{\circ}\text{C}$) 和降雪日数 (日降雪量 $>0.1\text{mm}$) 的空间分布图。华东中部和南部、华中大部、华南北部降水日数有10 d以上 (图2a), 较常年同

期偏多4 d以上（图2b）。华东中部和北部、华中中部和北部低温日数达到8 d以上（图2c）。从降雪日数来看，华东中部和北部、华中、内蒙古大部、华北西部、西北地区中东部等地有6 d以上（图2d）；上述地区降雪日数较常年同期偏多2~6 d，局地偏多6 d以上（图略）。



注：黑色虚线方框区示意华东和华中区域（28°~36°N、110°~122°E）。

图 2 2024 年 2 月全国 (a) 降水日数及 (b) 距平, (c) 低温日数和 (d) 降雪日数空间分布
Figure 2. Spatial distribution map of (a) rain days and (b) its anomalies, (c) low temperature days and (d) snow days in February 2024 in China

由上述分析可见，2月华南以北大部地区降水偏多，黄河流域及其以北大部地区以降雪为主、江南南部以降水为主，而华东和华中雨雪相态复杂，以冻雨或雨夹雪为主，造成的影响、损失也最大。这种降水性质的南北不同分布是由气温、地形和大气环流以及云的微物理过程等因子决定的。从1961–2024年2月华东和华中平均降水量和低温日数历年变化（图3）可见，2024年2月华东和华中

中平均降水量高达111.6mm，较常年同期偏多131.8%，位列1961年以来第一；低温日数为7.7d，较常年同期偏多5d，为1985年以来最多。由此可见，2024年2月华东和华中的低温雨雪冰冻事件极端性较强。

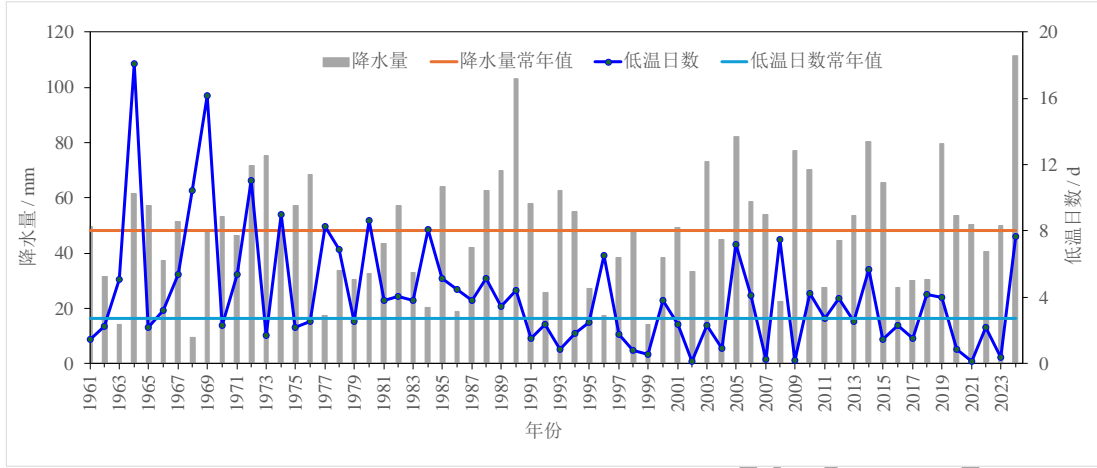


图3 1961–2024年华东和华中平均的2月降水量和低温日数历年变化

Figure 3. Time series of averaged precipitation and low temperature days in February in east and central China during 1961–2024

由华东和华中区域平均的气温和降水的逐日变化（图4）可见，2月2—9日日最低气温持续低于 0°C ，最强雨雪过程出现在1月31日至2月4日，降水量大于3mm；2月9日之后气温回升，其中日最高气温回升较快，13–14日达到 20°C 以上，而日最低气温回升相对较慢，10–19日日平均气温大于 5°C ，10d中有9d的日降水量小于2mm；伴随着20日开始的第二轮大范围降温、雨雪过程快速降温，20–29日日最高、日平均和日最低气温变化范围分别为 $0\sim 5^{\circ}\text{C}$ 、 $-2\sim 5^{\circ}\text{C}$ 和 $-3\sim 3^{\circ}\text{C}$ ，10d中有7d的日降水量大于3mm，最大降水量出现在20–23日（图4）。综上所述，2月华东和华中的天气过程大致上可以分为以下三段：1月31日至2月8日，第一轮大范围低温雨雪冰冻天气过程；2月9–19日，天气晴好；2月20–29日，第二轮大范围低温雨雪冰冻天气过程。

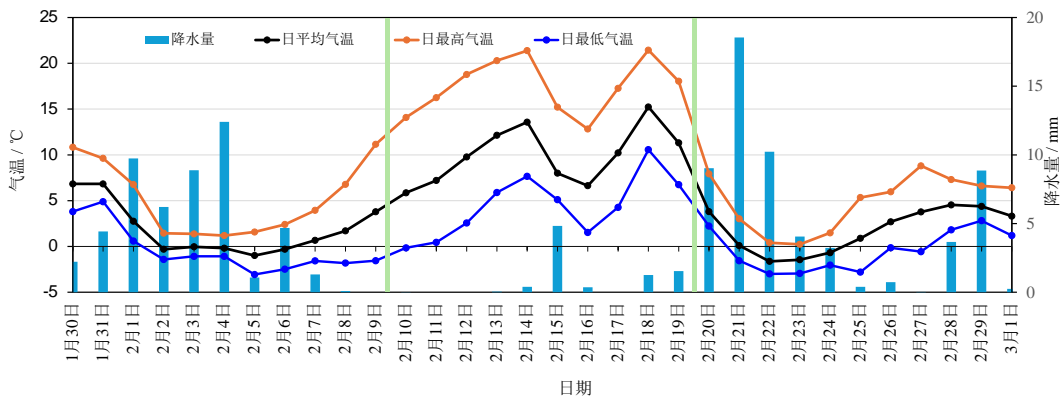


图4 2024年1月30日至3月1日华东和华中平均的日平均气温、日最高气温、日最低气温和日降水量逐日变化

Figure 4. Daily mean temperature, Tmax, Tmin temperature and precipitation in east and central China from 30 January to 1 March 2024

3 大气环流异常特征及其对“2402 冰雪灾害”的影响

图5为2024年2月和月内三个阶段的北半球500hPa位势高度和距平场、850hPa风距平场，由图可见，欧亚中高纬环流和副热带环流均表现出明显的月内阶段性转折变化特征。

首先，从整月来看，乌拉尔山西侧的脊区为明显的正距平，我国西部至西西伯利亚平原中部为明显的负距平，表明冷空气活动较为频繁，从而导致我国2月温度整体偏低。我国中东部至西北太平洋和我国西部形成“东高西低”型梯度，西北太平洋15°N以北为明显的反气旋性距平环流，我国长江流域以南地区为西南风距平（图5a），水汽输送条件较好。从指数监测来看，东亚冬季风、西伯利亚高压、南支槽、西北太平洋反气旋四个系统的强度指数标准化值分别为0.37、1.01、1.06和0.64，即四者均偏强；副高强度为1961年以来第一、西伸脊点异常偏西、脊线略偏北，但北界明显偏北。

2月上旬，欧亚中高纬度呈“两槽一脊”，两槽分别位于欧洲北部—乌拉尔山和鄂霍次克海，脊位于贝加尔湖，槽脊均偏强；我国呈“东高西低”位势高度异常；西北太平洋为反气旋和南支槽（图5b），均偏强，水汽输送条件较好。西伯利亚高压偏强、位置偏东。从西伯利亚高压、东亚冬季风、南支槽和东亚

经向水汽输送这四个关键环流系统强度指数的逐日变化可见，1月下旬至2月8日，西伯利亚高压和东亚冬季风强度指数均持续正异常（图6a）；1月下旬后期南支槽和东亚经向水汽输送强度指数开始转为正值并持续到2月8日（图6b），表明来自印度洋的水汽输送和西太平洋经向水汽输送均偏强；冷暖空气在我国中东部地区辐合，导致了第一轮大范围的低温冰冻雨雪天气过程，华中大部气温偏低 4°C 以上；华东和华中大部偏多2倍以上（图7a）。

2月中旬，欧亚中高纬环流调整为“两脊一槽”型环流，欧洲—乌拉尔山南部调整为高压脊，哈萨克斯坦—贝加尔湖调整为低压槽，日本岛为高压脊；副高脊线位于 15°N 以南，较常年同期偏南；我国大部分地区位势高度呈正距平，即欧亚地区总体转为“南高北低”分布（图5c），有利于我国气温偏高。2月9—16日，西伯利亚高压和东亚冬季风强度指数总体为负值（图6a），南支槽强度指数转为负值，西太平洋经向水汽输送强度指数波动较大（图6b），冷空气和暖湿水汽均减弱，导致我国中东部大部晴朗少雨，气温较常年同期偏高 2°C 以上，降水偏少5成以上（图7b）。

2月下旬，欧亚环流形势再度发生明显调整。中旬的欧洲—乌拉尔山南部高压脊向东发展，从乌拉尔山一直延伸至中西伯利亚平原，呈现西南—东北向；而伊朗高原至贝加尔湖为西南—东北向偏强的低压槽，二者形成较大的位势梯度，导致我国西部经向环流偏强，西伯利亚高压转为异常偏强；副高异常偏强、偏北，西北太平洋反气旋环流和南支槽均转为偏强（图5d）。从环流指数逐日变化可见，2月17日开始，西伯利亚高压和东亚冬季风强度指数转为正值并持续到3月初（图6a），导致我国发生一次超强寒潮，大部地区气温偏低 4°C 以上。在南支槽和菲律宾反气旋异常偏强的共同影响下，冷暖空气在我国中东部地区辐合，导致了第二轮大范围的低温冰冻雨雪天气过程，华东大部和华中大部均偏多2倍以上（图7c），此次雨雪的落区与上旬的落区基本重合，导致部分地区雨雪冰冻加重。

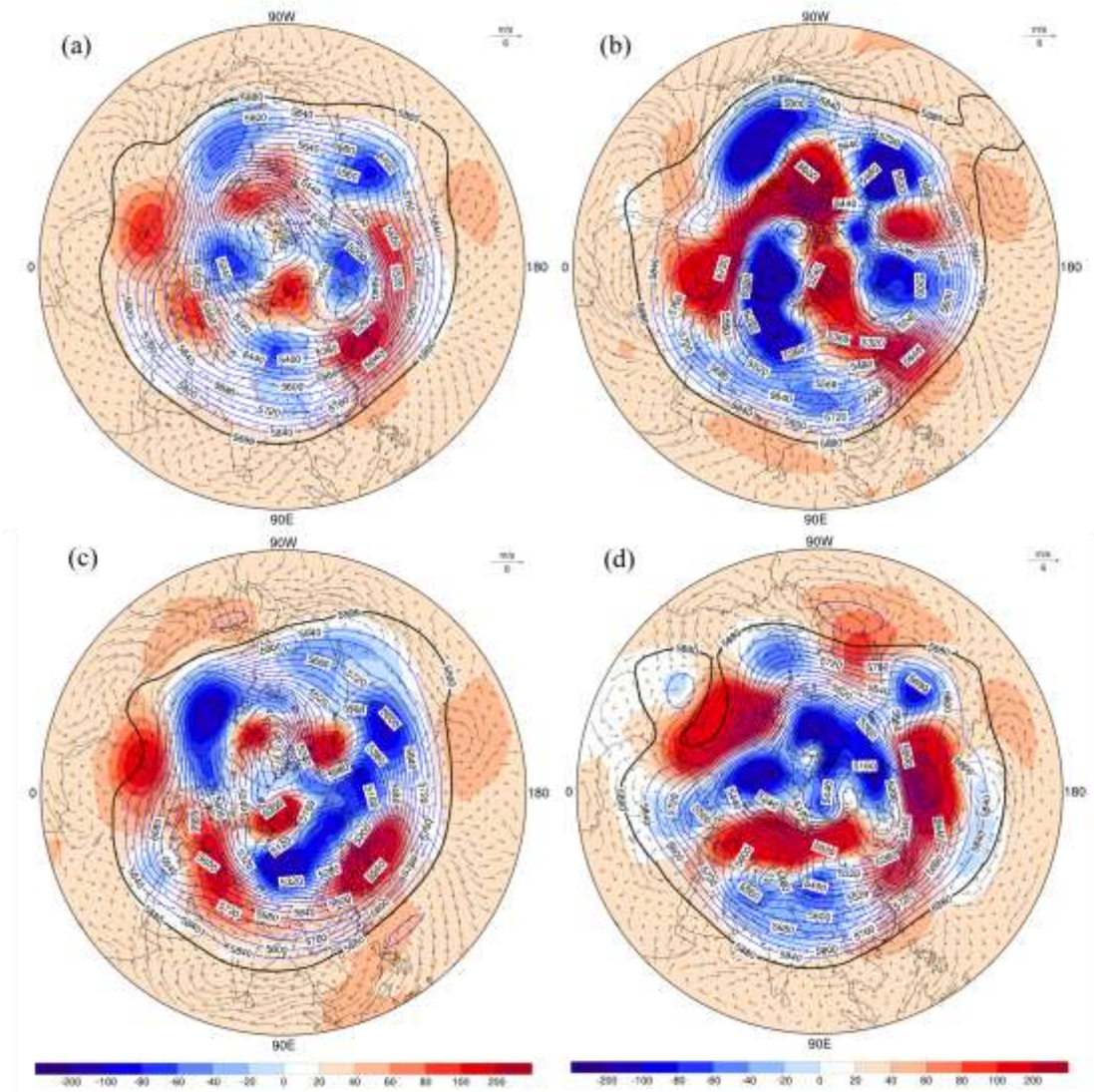


图 5 2024 年 2 月 500hPa 高度（等值线，单位，gpm）和距平场（阴影，单位，gpm）、850hPa 风场距平（风矢，单位： m s^{-1} ）

(a) 2 月, (b) 1 月 31 日至 2 月 8 日, (c) 2 月 9–19 日, (d) 2 月 20–29 日

Figure 5. 500hPa geopotential height (contours, unit: gpm) and its anomalies (shading, unit: gpm), and 850 hPa wind anomalies (vectors, unit: m s^{-1}) in February 2024(a) February, (b) from 31Jan to 8 February, (c) from 9 to 19February, (d) from 20 to 29February.

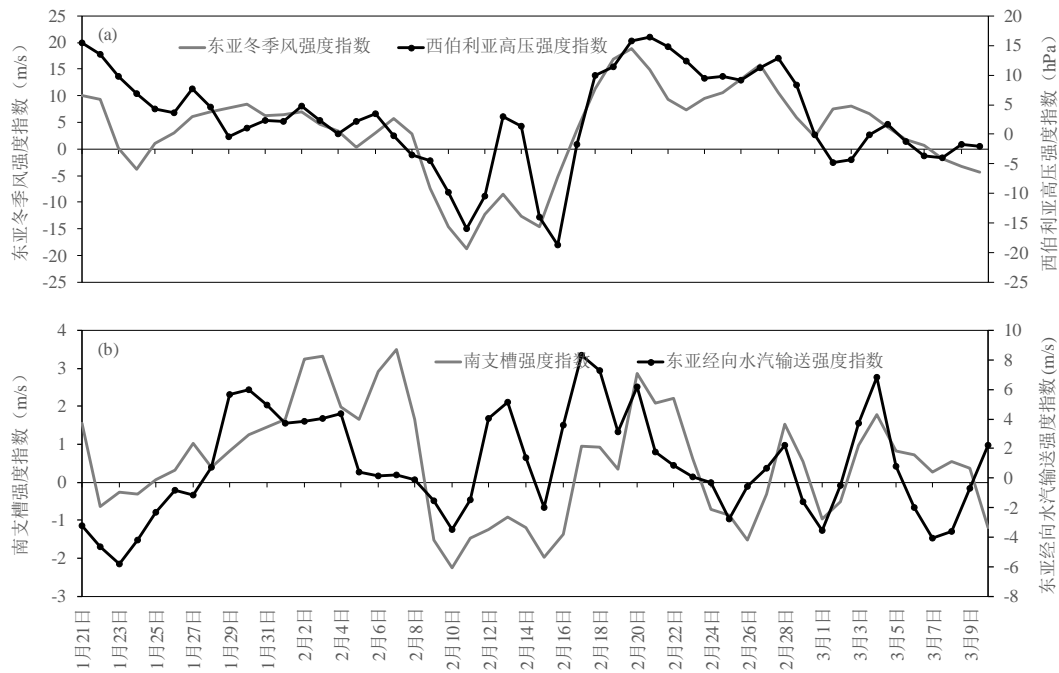


图6 2024年1月21日至3月10日关键环流强度指数距平的逐日变化

(a) 东亚冬季风和西伯利亚高压强度指数, (b) 南支槽和东亚经向水汽输送强度指数

Figure 6. Daily variation of indices from 21Jan to 10Mar in 2024

(a) East Asian winter monsoon intensity index and Siberian High intensity index, (b) South Trough intensity index and East Asian meridional water vapor transport intensity index

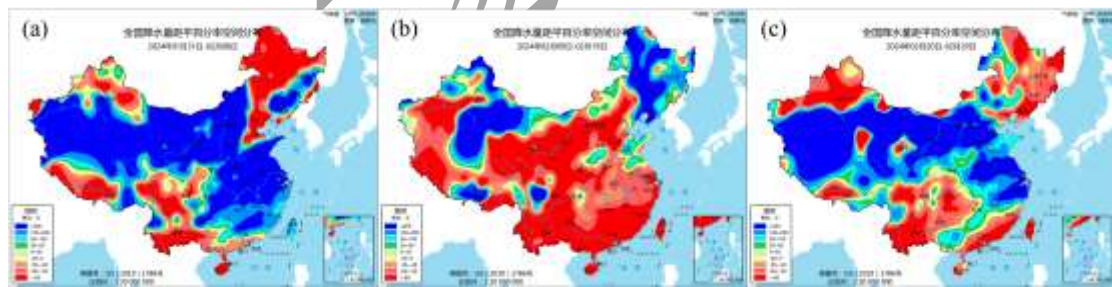


图7 2024年2月三个阶段全国降水距平百分率

(a) 1月31日至2月8日, (b) 2月9-19日, (c) 2月20-29日

Figure 7. Precipitation anomaly percentage in three stages in 2024

(a) from 31Jan to 8 February, (b) from 9 to 19February, (c) from 20 to 29February

4 热带海温对“2402 冰雪灾害”的影响

ENSO作为年际尺度上热带海气系统的最强信号，对东亚气候的年际变化有重要的影响（Wang et al, 2000；陈丽娟等，2013；Li et al, 2019）。2023年5月至2024年4月，赤道中东太平洋发生了一次中等强度的El Niño事件，峰值出现在2023年12月（竺夏英等，2024）。2024年冬季赤道中东太平洋海温为大范围的正距平，中心位于东太平洋，部分海区超过2℃，热带印度洋和热带北大西洋海温也为大范围正距平，中心分别出现在热带印度洋西部和热带大西洋东部，中心异常值分别达到1℃和1.5℃以上（图8a）。从1979–2024年冬季的Niño3.4、TIO和TNA指数的逐年变化可见（图8b），三个指数分别位列1979年以来第四、第一和第一，表明三大海洋暖海温异常均较为极端。从南方涛动（SOI）的响应来看，2023年5月至2024年2月（除了2023年6月和2024年1月）SOI持续负指数（图略），即热带大气对El Niño事件表现出持续的响应。

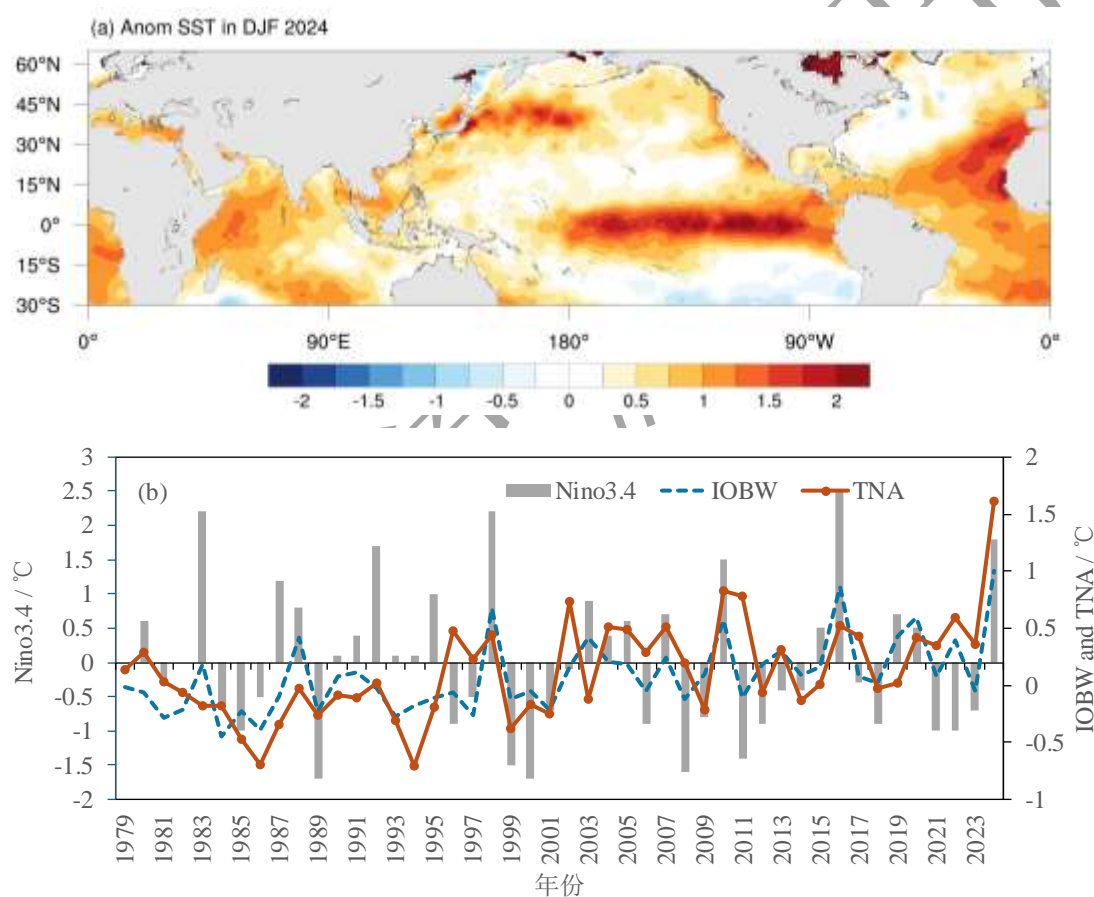
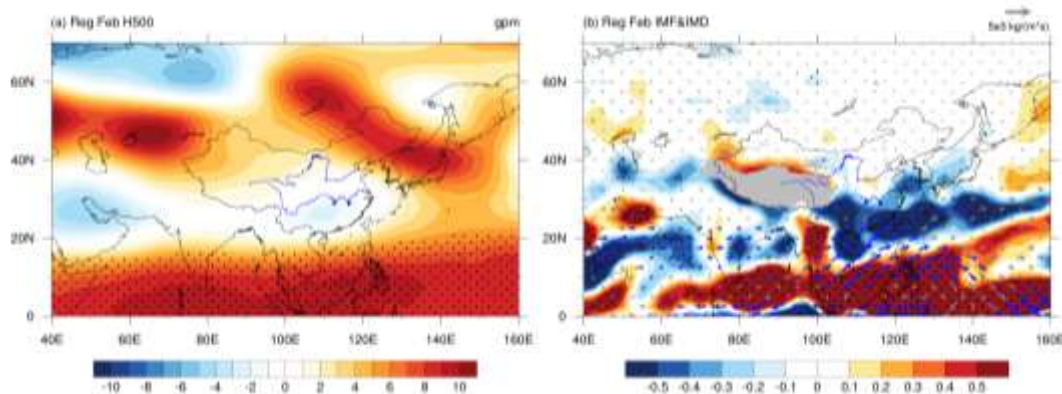


图 8 (a) 2024 年冬季 SST 距平分布和 (b) 1979–2024 年冬季的 Niño3.4 指数、TIO 指数、TNA 指数

Figure 8. (a) Distribution of sea surface temperature anomalies (unit: °C) in winter 2024 and (b) the winter Niño3.4, TIO and TNA indeies during 1979–2024

2024 年 2 月的西太平洋副热带环流异常与 El Niño 密切相关。图 9 给出了 1979–2024 年冬季 Niño3.4 指数回归的 2 月 500hPa 位势高度距平场、整层水汽通量和散度距平场。由图 9a 可见，热带至副热带地区（0~20°N）的 500hPa 位势高度距平为显著的正异常，有利于副高的增强和西伸，中高纬位势高度异常不显著；热带至副热带西北太平洋为异常反气旋水汽输送通量，长江流域及其以南地区为水汽辐合距平区（图 9b）。此外，已有研究表明，热带印度洋海温和热带大西洋也可以通过海气相互作用影响副高和西北太平洋反气旋，两大洋海温偏暖时，均有利于副高和西北太平洋反气旋偏强（Xie et al, 2009; 2016; 赵俊虎等, 2018; 2021; Zuo et al, 2019; Zhao et al, 2022; 2023）。表 1 给出了冬季三大洋海温指数与 2 月关键环流系统指数的相关系数。可见，副高强度和三大洋海温指数的正相关最显著，其次是东亚经向水汽输送强度，副高偏强有利于引导热带和副热带西太平洋水汽向东亚地区输送。2024 年 2 月副高强度为 1961 年以来历史第一、西伸脊点达 90°E（月内持续偏强、偏西），除受到 El Niño 的衰减的影响外，还与破纪录偏暖的热带印度洋和热带北大西洋海温有关。三大洋海温异常共同导致副高异常偏强、西北太平洋反气旋阶段性偏强，为 2024 年 2 月我国中东部两次大范围雨雪过程提供了充足的水汽条件。此外，Chen et al (2004) 研究指出东亚地区寒潮发生频率的年际变化与 ENSO 循环有关，ENSO 通过调控北太平洋天气尺度短波槽脊引起东亚地区寒潮活动的异常，在 El Niño (La Niña) 年冬季寒潮发生的频率更高 (更低)。因此，El Niño 事件还可能是 2004 年 2 月两次低温寒潮的重要外强迫背景。



注：图 a 中圆点、图 b 中圆点和蓝色箭头，分别表示高度场异常、整层水汽散度异常、风场异常通过了 0.05 显著性水平检验。

图 9 1979–2024 年冬季 Niño3.4 指数回归的 2 月 (a) 500hPa 高度场距平场 (单位: gpm)、(b) 整层水汽通量距平 (箭头, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 和散度距平 (阴影, 单位: $10^{-5} \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$),

Figure 9. Regressions of (a) the 500 hPa geopotential height anomalies (units: gpm), (b) the vertically integrated (surface to 300 mb) water vapor flux (vectors; $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) and water vapor divergence anomalies (shadings; $10^{-5} \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) against the winter Niño3.4 index during 1979–2024

表 1 1979–2024 冬季海温因子与 2 月大气环流指数的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between winter SST indices and atmospheric circulation indices in

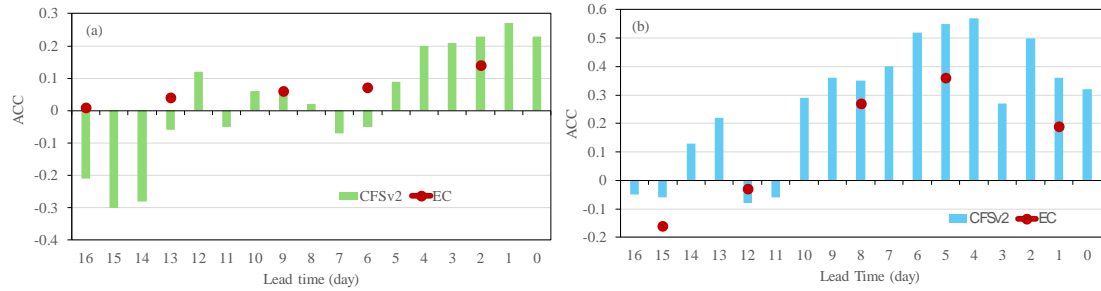
February during 1979–2024					
2 月 冬季	东亚冬季风 强度	副高 强度	南支槽 强度	东亚经向水汽 输送强度	华东和华中 降水
Nino3.4	-0.10(-0.09)	0.63**(0.77**)	0.07(0.05)	0.27(0.43**)	0.21(0.24)
TIO	-0.01(0.06)	0.80**(0.82**)	0.08(0.06)	0.45**(0.43**)	0.40**(0.31*)
TNA	-0.11(-0.10)	0.53**(0.49**)	0.10(-0.11)	0.30*(0.12)	0.16(-0.07)

注: *和**分别表示通过了 0.05 和 0.01 显著性水平检验; 括号外和括号内分别表示用原始数据和年际分量 (利用傅里叶分解的滤波方法得到 9 年以下的分量) 计算得到的相关系数。

5 次季节模式对“2402 冰雪灾害”的可预报性

此外, 提前多少天可以预测出“2402 冰雪灾害”的两次过程? 这也是预报员、决策部门较关注的问题。初步分析了 CFSv2 和 ECMWF 两个次季节模式对这两次雨雪过程的预测技巧 (图 10)。结果表明, 对第一轮过程而言, 两个模式在提前 14d 以上时, 预测全国降水的 ACC 均为负值, 未能预测出此次过程, 提前 13d 到提前 0d 时, ACC 总体上稳步提高, 尤其是提前 6d 到提前 0d 时, ACC 总体上接近 0.1, 提前 4d 到提前 0d 时, ACC 进一步提高, CFSv2 模式 ACC 达到 0.2 以上 (图 10a)。对第二轮过程而言, 两个模式在提前 15d 以上时, 预测 ACC 均为负值, 提前 14d 到提前 0d 时, ACC 总体上稳步提高, 尤其是提前 10d 到提前 0d 时, ACC 总体超过 0.2, 在提前 6d 到提前 4d 时, CFSv2 模式 ACC 达到 0.5 以上 (图 10b)。第二轮过程的预测技巧明显高于第一轮过程, 这可能与两次过程的降水范围不同有关, 第一轮过程全国大范围降水偏多, 而第

二轮过程主要是新疆南部至华北、黄淮至华南北部降水较常年偏多，而西南地区、东北等地降水偏少。此外，一周以内时，CFSv2 的预测技巧高于 ECMWF 模式。综上所述，次季节模式对 2 月份的两次大范围雨雪过程的预测时效和技巧有一定差异，对第一轮过程的预测时效大约为 1 周，而对第二轮过程的预测时效达 10d 左右，这与前人研究（Molten et al, 1996；丁瑞强和李建平, 2009）的结论“数值天气模式的可预报性上限为 2 周”相一致。



注：横坐标表示提前时间，如，图 a 中 16 表示提前 16d 起报，即 2024 年 1 月 15 日起报，以此类推。

图 10 CFSv2（柱状）和 ECMWF 模式（红点）不同超前时间对 2024 年（a）1 月 31 至 2 月 8 日和（b）2 月 20–29 日中国 2374 站降水距平预测的 ACC

Figure 10. Spatial anomaly correlation coefficient (ACC) of CFSv2 (columnar) and ECMWF model (red dot) for precipitation anomaly forecast of 2374 station in China during (a) 31Jan–8February and (b) during 20–29February, 2024 at different lead times

此外，通过评估 CFSv2 和 ECMWF 两个次季节模式对两次降雪/水过程对应的东亚环流的预测技巧，进一步分析模式对降水预测存在偏差的原因。图 11 给出了 CFSv2 模式提前 15d 和提前 5d 预测的两次过程的 500hPa 位势高度距平和 850hPa 风场距平。由图可见，提前 15d 时，CFSv2 模式预测的 2 月初欧亚中高纬以正距平为主（图 11b），与观测的欧亚中高纬“- + -”距平不符（图 11a），也未能预测出我国西部的负距平和西北太平洋至我国东北的正距平、及北印度洋至西北太平洋（10°~25°N）在 850hPa 的西风距平，预测的西伯利亚高压偏弱（图略），上述关键环流预测与实况不符，导致模式未能准确预测出 2 月初的天气过程；而提前 5d 时，CFSv2 模式预测的东亚环流异常（图 11c）与观测接近，模式也准确预测出了 2 月初的天气过程。

对于 2 月下旬的过程，CFSv2 模式提前 15d 时预测的西亚至我国西部、我国东部至西北太平洋西部的 500hPa 距平、我国东南部 850hPa 风场距平均与观测相反（图 11a, 11b），预测的西伯利亚高压偏弱（图略），导致模式未能准确预测出 2 月下旬我国中东部地区的大范围低温雨雪冰冻天气过程；而提前 5d 时，CFSv2 模式预测的东亚环流异常（图 11c）与观测接近，模式也准确预测出了 2

月下旬的天气过程。ECMWF 模式的预测结果与 CFSv2 模式相近（图略）。由此可见，模式在提前 2 周以上时无法准确预测欧亚中高纬环流系统的异常特征，导致了模式对我国两次低温雨雪冰冻过程的预测能力有限。

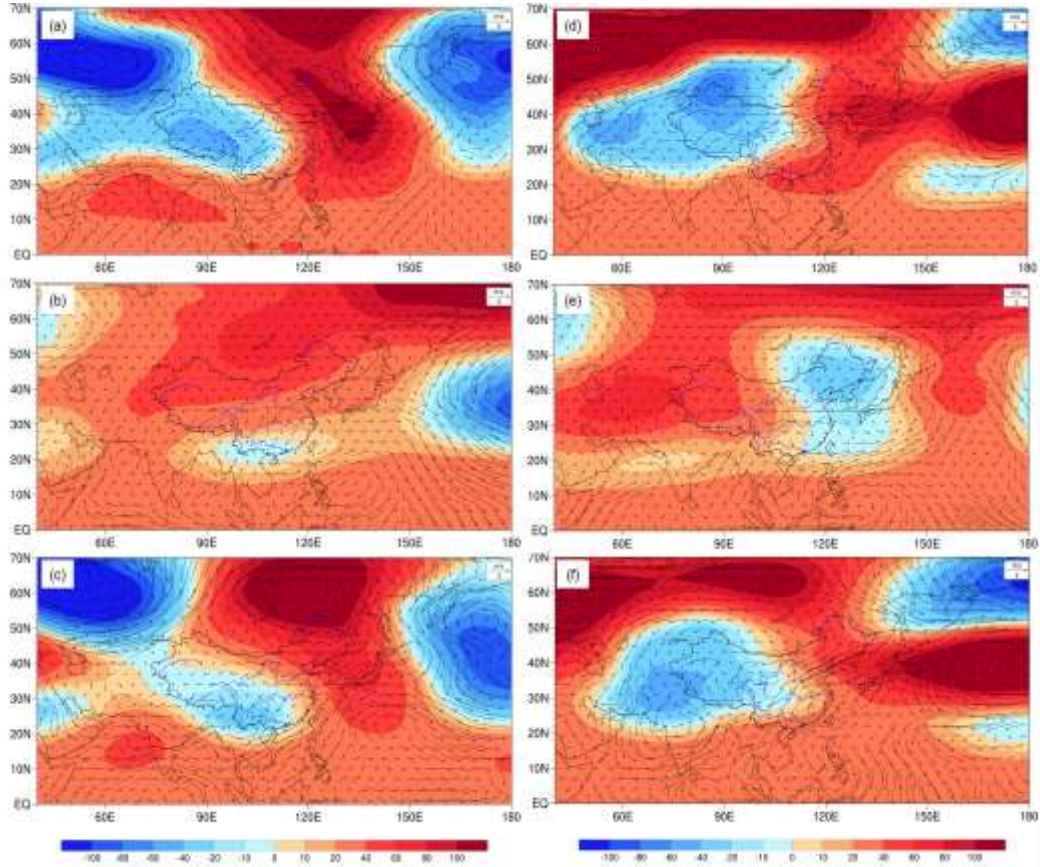


图 11 2024 年 2 月 (a, b, c) 1 月 31 至 2 月 8 日和 (d, e, f) 2 月 20–29 日东亚地区 500hPa 位势高度距平（阴影区，单位，gpm）和 850hPa 风场距平（单位： m s^{-1} ）

(a, d) 观测，(b, e) CFSv2 模式提前 15d 预测结果，(c, f) CFSv2 模式提前 5d 预测结果

Figure 11. 500hPa geopotential height anomalies (shading, unit: gpm) and 850 hPa wind anomalies (vectors, unit: m s^{-1}) in (a,b,c) early February 31Jan–8February) and (d, e, f) late February (20–29February) 2024

(a,d) observation, (b,e) prediction by CFSv2 at forecast lead times of 15d, (c,f) prediction by CFSv2 at forecast lead times of 5d

6 结论和讨论

本文分析了“2402 冰雪灾害”的特征、成因和次季节模式的可预测性，结论如下：

(1) 2024年1月末至2月上旬、2月中旬末至下旬我国华东和华中地区发生了两次大范围低温雨雪冰冻天气，过程影响范围广、累计雨雪量大、持续时间长、冻雨面积大，气温偏低1~2℃，降水偏多1倍以上，为1961年以来历史同期最多。两次天气过程发生在春运高峰期，发生地区重叠度高，导致灾害严重。

(2) 2月北半球大气环流月内变化较大，1月底至2月上旬西伯利亚高压持续偏强，引发东亚发生一次大范围的寒潮天气，期间副高位置偏北，南支槽和西北太平洋反气旋阶段性增强，引导来自印度洋和西太平洋的暖湿气流向我我国中东部地区输送，造成了第一轮大范围低温雨雪冰冻天气；2月中旬副高偏南，西伯利亚高压、南支槽和西北太平洋反气旋同步减弱，我国大部分地区天气晴好；2月下旬副高位置偏北，西伯利亚高压、南支槽和西北太平洋反气旋再次同步增强，造成了第二轮大范围低温雨雪冰冻天气。影响两次大范围低温雨雪冰冻天气过程的东亚副热带和欧亚中高纬环流系统的配置较为一致，副高持续偏强为两次雨雪过程提供了较好的水汽条件。

(3) 2023年5月开始，赤道中东太平洋发生一次中等强度的 El Niño 事件，峰值出现在 2023 年 12 月。此外，冬季热带印度洋和热带北大西洋海温异常偏暖，均为 1979 年以来第一位。El Niño 和异常偏暖的热带印度洋和热带北大西洋共同导致了冬季副高持续偏强，也有利于西北太平洋反气旋的阶段性发展和增强，为 2 月的两次冰雪过程提供了充沛的水汽条件。年际尺度上，三大洋与西伯利亚高压、南支槽的关系不显著，后两者在 2024 年 2 月表现出的准双周的阶段性变化可能与其他外强迫和大气内部动力过程有关。

(4) CFSv2 和 ECMWF 两个次季节模式对 2024 年 2 月两次雨雪过程的可预报性分析表明，次季节模式对两次过程的预报时效大约在 1~2 周左右，1 周内的预测技巧较高，模式起报时间在提前 2 周以上时，无法准确预测欧亚中高纬环流系统的异常特征。

本文从“2402 冰雪灾害”的灾害特征、成因和次季节可预报性角度进行了分析，所得结论为此次冰雪灾害的机理认识、预测研究提供了一些参考。但仍有一些科学问题未进行解答，例如，西伯利亚高压、东亚冬季风和南支槽等关键环流系统的准双周的振荡机理是什么？三大洋海温对副高的影响贡献分别是多少？由于本文篇幅有限，未开展深入探讨，今后需要进一步开展研究。

参考文献

- 陈丽娟, 袁媛, 杨明珠, 等, 2013. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展[J]. 应用气象学报, 24(5): 521-532. Chen L J, Yuan Y, Yang M Z, et al, 2013. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM[J]. J Appl Meteor Sci, 24(5): 521-532 (in Chinese).
- 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).
- 丁瑞强, 李建平, 2009. 天气可预报性的时空分布[J]. 气象学报, 67(3): 343-354. Ding R Q, Li J P, 2009. The temporal-spatial distributions of weather predictability of different variables[J]. Acta Meteor Sin, 67(3): 343-354 (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 (in Chinese), 66(5): 808-825.
- 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).
- 高辉, 陈丽娟, 贾小龙, 等, 2008. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 II. 成因分析[J]. 气象, 34(4): 101-106. Gao H, Chen L J, Jia X L, et al, 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in South China during January 2008: II. possible climatic causes[J]. Meteor Mon, 34(4): 101-106 (in Chinese).
- 龚道溢, 朱锦红, 王绍武, 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 D Y, Zhu J H, Wang S W, 2002. The influence of Siberian High on large-scale climate over continental Asia[J]. Plateau Meteor, 21(1): 8-14 (in Chinese).
- 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).
- 王东海, 柳崇健, 刘英, 等, 2008. 2008 年 1 月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析[J]. 气象学报, 66(3): 405-422. Wang D H, Liu C J, Liu Y, et al, 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the Southern China in January 2008[J]. Acta Meteor Sin, 66(3): 405-422 (in Chinese).
- 王璠, 张峰, 符娇兰, 2022. 2022 年 2 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 48(5): 658-664. Wang F, Zhang F, Fu J L, 2022. Analysis of the February 2022 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 48(5): 658-664 (in Chinese).
- 王凌, 高歌, 张强, 等, 2008. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 I. 气候特征与影响评估[J]. 气象, 34(4): 95-100. Wang L, Gao G, Zhang Q, et al, 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in South China during January 2008: I. climatic features and its impact[J]. Meteor Mon, 34(4): 95-100 (in Chinese).
- 许先煌, 张芳华, 2024. 2024 年 2 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 50(5): 642-648. Xu X H, Zhang F H, 2024. Analysis of the February 2024 atmospheric circulation and weather [J]. Meteor Mon, 50(5): 642-648.
- 杨贵名, 孔期, 毛冬艳, 等, 2008. 2008 年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析[J]. 气象学报, 66(5): 836-849. Yang G M, Kong Q, Mao D Y, et al, 2008. Analysis of the long-lasting

- cryogenic freezing rain and snow weather in the beginning of 2008[J]. *Acta Meteor Sin*, 66(5): 836-849 (in Chinese).
- 赵俊虎, 陈丽娟, 王东阡, 2018. 2016 年我国梅雨异常特征及成因分析 [J]. *大气科学*, 42(5): 1055–1066. Zhao J H, Chen L J, Wang D Q, 2018. Characteristics and causes analysis of abnormal Meiyu in China in 2016[J]. *Chin Atmos Sci* (in Chinese), 42(5): 1055–1066 (in Chinese).
- 俞小鼎, 费海燕, 王秀明, 2024. 2024 年 2 月 17—23 日中国大范围强寒潮雨雪冰冻强对流过程涉及的若干问题[J]. *气象*, 50(9):1033-1042. Yu X D, Fei H Y, Wang X M, 2024. Some issues concerning the large area rainstorm, snowstorm, sleet, freezing rain and severe convection event over China from 17 to 23 February 2024[J]. *Meteor Mon*, 50(9):1033-1042 (in Chinese).
- 赵俊虎, 张涵, 左金清, 等, 2021. 2020 年江淮流域超强梅雨年际异常的驱动因子分析[J]. *大气科学*, 45(6): 1433-1450. Zhao J H, Zhang H, Zuo J Q, et al, 2021. What drives the super strong precipitation over the Yangtze-Huaihe River Basin in the Meiyu Period of 2020?[J]. *Chin Atmos Sci* (in Chinese), 45(6): 1433-1450 (in Chinese).
- 竺夏英, 孙林海, 钟海玲, 等, 2024. 2023 年中国气候异常特征及主要天气气候事件[J]. *气象*, 50(2): 246-256. Zhu X Y, Sun L H, Zhong H L, et al, 2024. Characteristics of climate anomalies and major meteorological events over China in 2023[J]. *Meteor Mon*, 50(2): 246-256 (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. *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. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(5): 781-788.
- Chang C P, Lu M M, 2012. Intraseasonal predictability of Siberian high and East Asian Winter monsoon and its interdecadal variability[J]. *J Climate*, 25(5): 1773-1778.
- 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.
- 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.
- 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 H M, Webster P J, Curry J A, 2012. Seasonal prediction skill of ECMWF system 4 and NCEP CFSv2 retrospective forecast for the Northern Hemisphere winter[J]. *Clim Dyn*, 39(12): 2957-2973.
- Li J P, Zheng F, Sun C, et al, 2019. Pathways of influence of the Northern Hemisphere mid-high latitudes on East Asian climate: A review[J]. *Adv Atmos Sci*, 36(9): 902-921.
- Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al, 1996. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 122(529): 73-119.
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al, 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate[J]. *J Climate*, 15(13): 1609-1625.
- Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al, 2014. The NCEP climate forecast system version 2[J]. *J Climate*, 27(6): 2185-2208, doi: .
- Wang B, Wu R G, Fu X O H, 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate?[J]. *J Climate*, 13(9): 1517-1536.
- 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.
- Wu R G, Kinter III J L, Kirtman B P, 2005. Discrepancy of interdecadal changes in the Asian region among the NCEP-NCAR reanalysis, objective analyses, and observations[J]. *J Climate*, 18(15): 3048-3067.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al, 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño[J]. *J Climate*, 22(3): 730-747.
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al, 2016. Indo-Western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review[J]. *Adv Atmos Sci*, 33(4): 411-432.
- Zhao J H, Zhang H, Zuo J Q, et al, 2022. Oceanic drivers and empirical prediction of interannual rainfall variability in late summer over Northeast China[J]. *Clim Dyn*, 58(3-4): 861-878.
- Zhao J H, Zuo J Q, Zhang H, et al, 2023. Extreme precipitation driven by the rapid tropical Atlantic warming and the second developing La Niña over the Yangtze-Huaihe River Basin in August 2021[J]. *Clim Dyn*, 61(5-6): 2581-2598.
- Zheng F, Yuan Y, Ding Y H, et al, 2022. The 2020/21 extremely cold winter in China influenced by the synergistic effect of La Niña and warm Arctic[J]. *Adv Atmos Sci*, 39(4): 546-552.
- Zuo J Q, Li W J, Sun C H, et al, 2019. Remote forcing of the northern tropical Atlantic SST anomalies on the western North Pacific anomalous anticyclone[J]. *Clim Dyn*, 52(5-6): 2837-2853.