暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

2024年2月湖北省两次雨雪冰冻天气特征及海温影响分析

吴瑶 郭广芬 史瑞琴 夏智宏 秦鹏程 梁之辰

Analysis of weather characteristics and sea surface temperature impact on rainfall/snowfall and freezing events in Hubei Province in February 2024

WU Yao，GUO Guangfen，SHI Ruiqin，XIA Zhihong，QIN Pengcheng，LIANG Zhichen

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-110

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

2024年2月我国中东部两次持续性低温雨雪冰冻过程的环流异常特征分析

Characteristics of circulation anomalies of two continuous low temperature rain and snow freezing weather processes in eastern China in February 2024

暴雨灾害. 2024, 43(4): 384-394 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-108

湖北省持续低温雨雪过程评估与分析

Evaluation and analysis of continuous low temperature rain and snow process in Hubei Province

暴雨灾害. 2024, 43(4): 440-447 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-108

基于低温-雨雪-冻雨综合强度指数的湖北省冰冻事件分型及灾损评估

Typing and disaster loss evaluation of freezing events based on the comprehensive intensity index of low temperature, rainfall/snowfall and freezing in Hubei Province

暴雨灾害. 2024, 43(4): 448-457 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-078

2024年2月初贵州东部及长江中下游低温雨雪冰冻天气的基本特征及成因

Characteristics and causes of low-temperature rainfall/snowfall and freezing weather event in eastern Guizhou and the middle and low reaches of the Yangtze River in early February 2024

暴雨灾害. 2024, 43(4): 395-406 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-100

2024年2月湖北省一次大范围冻雨过程的宏微观特征及形成机制初探

Study on the macro and micro characteristics of a large-scale freezing rain weather event in Hubei Province

暴雨灾害. 2024, 43(4): 458-468 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-131

2024年初两次雨雪冰冻天气过程对公路通行影响的对比分析

Comparative analysis of two rainfall/snowfall and freezing weather events impact on the highway in early 2024

暴雨灾害. 2024, 43(4): 490-498 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-071

关注微信公众号，获得更多资讯信息

吴瑶,郭广芬,史瑞琴,等.2025. 2024 年 2 月湖北省两次雨雪冰冻天气特征及海温影响分析[J].暴雨灾害,44(1):31−40. WU Yao, GUO Guangfen, SHI Ruiqin, et al. 2025. Analysis of weather characteristics and sea surface temperature impact on rainfall/snowfall and freezing events in Hubei Province in February 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters,44(1):31−40 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−110

2024 年 2 月湖北省两次雨雪冰冻天气特征及海温影响分析

吴瑶[1, 3], 郭广芬[1, 2, 3], 史瑞琴[1, 2, 3], 夏智宏[1, 2, 3], 秦鹏程[1, 2, 3], 梁之辰[1, 2, 3]

(1. 武汉区域气候中心, 武汉 430074; 2. 中国气象局流域强降水重点开放实验室, 武汉 430205; 3. 三峡国家气候观象台, 宜昌 443002)

摘　要: 2024 年 2 月湖北省连续发生两次雨雪冰冻天气, 其中冻雨造成的灾害尤其严重, 为深入分析这两次雨雪冰冻天气的成因, 利用湖北省 82 个国家气象站 1961 年以来逐日观测、再分析及海温和环流指数资料, 基于改进的持续低温雨雪冰冻强度综合指数, 将这两次过程与 2008 年最强雨雪冰冻天气特征进行比较, 并分析了这两次过程的环流异常特征及海温的影响, 结果表明: (1) 2024 年 2 月两次过程雨雪相态更复杂、冻雨范围和极端性均强于 2008 年, 但持续时间和积雪深度不及 2008 年; (2) 500 hPa 位势高度距平场为有利于降水的典型 “西低东高”分布, 西太平洋副热带高压 (简称西太副高) 异常增强, 配合东路冷空气, 形成持续低温雨雪冰冻天气过程; 第一次过程具有更深厚的暖层条件和更强的西南水汽, 以降冻雨为主; 第二次过程冷空气相对更强, 但西南水汽减弱, 以冰粒和霰为主, 期间夹杂冻雨, 雨雪相态更为复杂; (3) 2024 年 2 月两次过程发生于一次中等偏强厄尔尼诺事件达到峰值并开始衰减的海温背景下, 印度洋异常增暖且呈“西暖东冷”分布, 导致后冬西太副高异常增强、南方水汽充足; (4) 我国黄海至日本海附近异常暖海温在日本海上空强迫出异常反气旋环流, 阻挡西风带气流东移, 冷空气南下与增强的西太副高输送的南方水汽交汇, 形成持续雨雪冰冻天气。

关键词: 低温雨雪冰冻; 湖北省; 环流异常; 海温异常

中图法分类号: P461^{+}.2　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−110

Analysis of weather characteristics and sea surface temperature impact on rainfall/snowfall and freezing events in Hubei Province in February 2024

WU Yao[1, 3], GUO Guangfen[1, 2, 3], SHI Ruiqin[1, 2, 3], XIA Zhihong[1, 2, 3], QIN Pengcheng[1, 2, 3], LIANG Zhichen[1, 2, 3]

(1. *Wuhan Regional Climate Center*, *Wuhan* 430074; 2. *Key Laboratory of Basin Heavy Rainfall*, *CMA*, *Wuhan* 430205; 3. *Three Gorges National Climatological Observatory*, *Yichang* 443002)

Abstract: In February 2024, Hubei Province experienced two low temperature, rainfall/snowfall and freezing events. Particularly, the damage caused by freezing rain was especially severe. To analyze the causes of the two rainfall/snowfall and freezing events, the reanalysis, the sea temperature and circulation index, the daily observation data from 82 national meteorological stations in Hubei Province since 1961 were used. Based on the improved composite index of persistent low temperature, rainfall/snowfall and freezing intensity, these two events characteristics were compared with the strongest rainfall/snowfall and freezing weather in 2008. Then the circulation anomalies and the influence of sea surface temperature (SST) of these two events was analyzed. The results are as follows. (1) During the two events in February 2024, the rain and snow phases were more complex, with a larger freezing rain range and stronger extremity compared to those in 2008. But the duration and snow depth were less severe than those in 2008. (2) The 500 hPa geopotential height anomaly was a typical “low in the west and high in the east” distribution, which is favorable for precipitation. The anomaly of the western Pacific subtropical high (WPSH) was enhanced, combined with the cold air from the east, forming persistent low temperature, rainfall/snowfall and freezing weather. The first event had deeper warm layer conditions and stronger southwest water vapor, mainly dominated by freezing

收稿日期: 2024−06−01; **定稿日期**: 2024−09−16

资助项目: 湖北省自然科学基金项目 (2023AFD097, 2023AFD103); 长江流域气象开放基金项目 (CJLY2022Y07); 武汉市气象科技联合基金项目 (2024020901030459)

第一作者: 吴瑶, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: wzd361301@163.com

通信作者: 郭广芬, 主要从事短期气候预测及决策气象服务研究。E-mail: 635499448@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

rain. The second event featured stronger cold air but weakened southwest water vapor, which was dominated by a mix of ice particles, graupel, and freezing rain, with more complex precipitation phases. (3) The two events in February 2024 occurred under the background of a moderately strong El Niño event reaching its peak and beginning to weaken. The Indian Ocean was abnormally warming and exhibited a distribution pattern of "warm in the west and cold in the east", which played an important role in the abnormal enhancement of the WPSH and the abnormal enhancement of water vapor in the south in the late winter. (4) The abnormally warm SST near the Yellow Sea to the Sea of Japan forced an anomalous anticyclonic circulation over the Sea of Japan, blocking the eastward movement of the westerly wind belt. The southward movement of cold air converged with the enhanced WPSH transporting southern water vapor, resulting in sustained rainfall/snowfall and freezing weather.

Key words: low temperatures, rainfall/snowfall and freezing; Hubei Province; circulation anomalies; abnormal sea surface temperatures

引　言

湖北省地处长江中游，属于中纬度南北气候过渡带，多次受到气温偏低、雨雪量大且持续时间长为特征的低温雨雪冰冻事件的影响 (李兰等, 2009; 彭京备和孙淑清, 2019; 孙晓娟等, 2022; 吕春艳等, 2024)，其中 2008 年 1 月 11 日—2 月 3 日低温雨雪冰冻过程 (以下简称为“0801”过程) 对湖北省的交通、农业、电力、通讯等各行各业均带来明显影响 (冯明等, 2009; 周月华和郭广芬, 2010)。诸多学者对这次低温雨雪冰冻天气的原因进行了分析，针对海温背景的影响，多数研究 (丁一汇等, 2008; 高辉等, 2008) 认为拉尼娜事件是本次低温雨雪事件发生的重要海温背景，与阻塞形势的建立和持续稳定有密切关系，亚洲中纬度大气环流经向度的异常发展加强，能为雨雪冰冻天气提供充足的冷空气条件，“0801”过程正是发生在这样的中高纬异常环流下；但另一方面，“0801”过程中，低纬度大气环流表现出的南支槽活跃、西太平洋副热带高压 (以下简称西太副高) 位置偏北偏西等异常特征，却与拉尼娜冬季环流并不相似；高正旭等 (2008) 也发现，拉尼娜背景下湖北省冬季气温偏低、降水偏少的概率更大，与“0801”过程的多雨特征不符；这样的南方降水和环流异常更接近厄尔尼诺事件的影响特征 (何溪澄等, 2008)。与“0801”过程的拉尼娜事件海温背景不同，2024 年 2 月湖北省发生的两次低温雨雪冰冻过程 (以下简称“2402”过程)，是发生在厄尔尼诺背景下。而厄尔尼诺背景下，湖北省发生雨雪冰冻天气的环流配置和海温外强迫的研究较少，有待深入探究并加以明确。

“2402”过程另一个重要特征是出现了明显冻雨，王遵娅 (2011) 和宗志平等 (2013) 研究表明，我国冻雨主要发生在长江以南一带，以贵州和湖南为易发区，湖北省冻雨一般发生在江汉平原地区。史瑞琴等 (2024) 针对“2402”过程冻雨的广泛影响和严重破坏性，基于万素琴 (2008) 提出的考虑多个降雨相态的持续低温雨雪冰冻综合强度指数，将冻雨作为致灾因子纳入评价体系，提出了改进的持续低温雨雪冰冻综合强度指数。本文利用 1961 年—2024 年湖北省 82 个国家站逐日观测资料、再分析及海温和环流指数资料，基于改进的雨雪冰冻综合强度指数对“2402”过程进行评价，并对比“0801”过程天气特征。在此基础上，探讨在厄尔尼诺海温衰减背景下，造成“2402”雨雪冰冻天气的大气环流异常特征和可能的海温外强迫因子影响，以期为湖北低温雨雪冰冻天气预测提供科学参考。

1 资料与方法

1.1 资料介绍

1.1.1 气象站点资料

本文所用的观测资料为湖北省气象大数据云平台“天擎”系统提供的湖北省 82 个国家气象观测站 1961—2024 年日平均气温、降水量、积雪日数以及 1981—2024 年电线积冰直径数据，用来分析比较湖北省低温雨雪过程的强度及天气特征，其中降水量的气候态为 1991—2020 年平均值。2024 年冻雨量数据来源于国家站的人工观测，冻雨的计量方法参照陈璇等 (2024)。

1.1.2 大气环流和海温资料

大气环流资料使用中国气象局国家气象信息中心提供的中国第一代全球大气再分析产品 CRA40 (40-yr Chinese global reanalysis dataset) 逐日 500 hPa 位势高度场、850 hPa 风场和气温场资料，时间段 1991—2024 年，空间分辨率为 1°×1°。文中气候态取 1991—2020 年平均。

海温资料使用 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 逐日高分辨率海温数据 (OISSTv2)，时间段为 2024 年 1—2 月，空间分辨率 0.25°×0.25°。

1.1.3 指数资料

环流和海温指数资料使用国家气候中心提供的 130 项气候指数集，采用 CRA40 产品计算，用于环流异常特征及海温影响分析，包含以下指数：

(1) 西太副高强度指数 (刘芸芸等, 2012)。定义为 (110°—180°E、10°—60°N) 范围内 500 hPa 高度场上 5 880 gpm 特征等值线范围内所围格点高度值减去 5 870 gpm 差值的总和, 文中使用 1981 年以来 1—2 月的逐日西太副高强度指数。

(2) 西太副高西段脊线指数 (刘芸芸等, 2012)。定义为 (110°—130°E、10°—60°N) 范围, 5 880 gpm 等值线所包围的西太副高体内纬向风 u 为 0, 且 $\partial u/\partial y>0$ 的特征线所在纬度位置的平均, 文中使用 2024 年 1—2 月的逐日西太副高脊线指数。

(3) 印度洋全区一致偏暖海温模态 (Indian Ocean Basin-Wide, IOBW) 指数 (Klein et al., 1999)。定义为热带印度洋 (40°—110°E, 20°S—20°N) 区域平均的海温距平, 文中使用近 30 a (1995—2024 年) 的逐月 IOBW 指数和 2023/2024 年冬季逐日 IOBW 指数。

(4) 热带印度洋偶极子 (Tropical Indian Ocean Dipole, TIOD) 指数 (Saji et al., 1999)。定义为热带西印度洋 (50°—70°E, 10°S—10°N) 的海温距平与热带东南印度洋 (90°—110°E, 10°S—0°) 的海温距平差, 文中使用 1981—2024 年的逐月 TIOD 指数。

1.2 研究方法

史瑞琴等 (2024) 已采用持续低温雨雪冰冻综合强度指数 (Z_i), 对湖北省的低温雨雪冰冻事件进行了评估。该指数由低温综合强度指数 (T_i)、雨雪综合强度指数 (P_i) 和冻雨综合强度指数 (F_i) 三部分组成, 计算公式如下

$$Z_i = T_i + P_i + F_i \tag{1}$$

其中, $i=1$，2，3，$\cdots n$, 为 1981 年 1 月至 2024 年 2 月低温雨雪过程数序号; (1) 式右三项计算公式为

低温综合强度指数 (T_i)

$$T_i = \left(\frac{d_t(i)}{\overline{d_t}} + \frac{t_m(i)}{\overline{t_m}} + \frac{t_n(i)}{\overline{t_n}}\right) \times \frac{m_t(i)}{n} \tag{2}$$

雨雪综合强度指数 (P_i)

$$P_i = \left(\frac{d_p(i)}{\overline{d_p}} + \frac{p_i}{\overline{p}} + \frac{h_i}{\overline{h}}\right) \times \frac{m_p(i)}{n} \tag{3}$$

冻雨综合强度指数 (F_i)

$$F_i = \left(\frac{d_f(i)}{\overline{d_f}} + \frac{D_m(i)}{\overline{D_m}} + \frac{N_i}{\overline{N}}\right) \times \frac{m_f(i)}{n} \tag{4}$$

T_i、P_i、F_i的前三项分母为所有过程各指标的平均值; 第四项$m_t(i)$、$m_p(i)$、$m_f(i)$为第i个过程所涉及的低温、雨雪和冻雨站数, n为测站总数。低温强度包括日平均气温≤0℃ 的最长连续日数 (d_t)、过程平均气温 (t_m)、极端最低气温 (t_n) 3 个评估指标, 雨雪强度包括最长雨雪日数 (d_p)、过程累计雨雪量 (p)、最大积雪深度 (h) 3 个评估指标, 冻雨强度包括冻雨日 (d_f)、电线积冰平均直径 (D_m) 和电线积冰最大直径≥5 mm 站数 (N) 3 个评估指标。对上述 9 个指标经过无量纲化后, 将低温、雨雪、冻雨三组指标分别乘以出现站数百分比, 作为低温、雨雪和冻雨综合强度指数, 再采用等权重方案求和计算持续低温雨雪冰冻综合强度指数。由于电线积冰资料从 1981 年开始记录, 且雨凇资料在 1981 年之前记录较为稀少, 使用该指数评估时段为 1981—2024 年。

2 “2402”过程强度及天气特征

“2402”雨雪冰冻天气过程可分为两个时段, 2024 年 2 月 1—7 日、20—26 日, 湖北省出现两段低温雨雪冰冻天气过程, 两段过程的降水相态复杂, 期间出现雨、冻雨、冰粒、雨夹雪、纯雪、冰霰、霰等 7 种降水相态。2024 年 2 月总降水量 99.5 mm, 达常年 2 月总降水量的近 2 倍, 排 1961 年以来同期第二位。全省平均积雪日数居 1961 年以来同期第二位, 仅次于 1964 年。30 个县 (市、区) 日平均气温低于 0 ℃ 日数超过 10 d, 居 1961 年以来同期第三位, 其中, 2 月 19—22 日寒潮为 1961 年以来冬季最强。

表 1 列出 1981 年以来综合强度和低温、雨雪、冻雨强度指数分别排前 5 位的雨雪冰冻过程, “2402”两次过程综合强度分别位列第二和第五位, 其中冻雨强度指数分别为 1.0 和 0.65, 排第一和第二位。

将“2402”两次过程与持续低温雨雪冰冻综合强度指数排第一位的“0801”过程 (陈正洪等, 2008; 王凌等, 2008) 对比, 有以下几个天气特点:

(1) 降水相态比 2008 年复杂。2024 年第一次过程先出现冻雨后出现暴雪, 形成叠加效应, 灾害影响较重; 第二次过程雨、雨夹雪、冻雨、冰粒、雪、霰和冰霰等 7 种降水相态反复出现。“0801”过程则以雨、雪和冻雨为主。

(2) 冻雨范围和极端性强于 2008 年。“2402”过程 77 站出现冻雨 (图 1), 日数范围 6~11 d; 平均最大电线积冰直径第一次过程 5.57 mm、第二次过程 3.47 mm。“0801”过程中冻雨出现在 1 月 20—22 日和 25—29 日, 共计 8 d, 18 站出现冻雨; 平均最大电线积冰直径 1.71 mm。

(3) 持续时间和积雪深度不及 2008 年。“2402”过程第一次低温雨雪天气持续 4~7 d, 最大积雪深度 23 站超过 10 cm, 其中 11 站超过 15 cm; 第二次持续 3~4 d, 最大积雪深度 4 站超过 10 cm。“0801”过程持续 17~22 d, 低温雨雪冰冻持续时间排历史第一

表 1 1981—2024 年湖北省低温雨雪冰冻、低温、雨雪、冻雨综合强度指数前 5 位过程发生时间及强度

Table 1 The intensity and occurrence time of the top five low temperature, rainfall/snowfall, freezing rain events in Hubei Province from 1981 to 2024

综合强度指数排位	低温雨雪冰冻		低温		雨雪		冻雨	
	发生时间/(年/月/日)	指数	发生时间/(年/月/日)	指数	发生时间/(年/月/日)	指数	发生时间/(年/月/日)	指数
1	2008/1/11—2008/2/3	2.17	2008/1/11—2008/2/3	1.00	2008/1/11—2008/2/3	1.00	2024/2/1—2024/2/7	1.00
2	2024/2/1—2024/2/7	1.97	1991/12/22—1992/1/4	0.82	1984/1/15—1984/1/31	0.87	2024/2/20—2024/2/26	0.65
3	1991/12/22—1992/1/4	1.76	1984/1/15—1984/1/31	0.66	1989/2/17—1989/3/2	0.85	1990/1/27—1990/2/7	0.32
4	1984/1/15—1984/1/31	1.71	2018/1/24—2018/2/1	0.55	1991/12/22—1992/1/4	0.67	1981/1/20—1981/2/2	0.32
5	2024/2/20—2024/2/26	1.40	1981/1/20—1981/2/2	0.42	1982/1/28—1982/2/13	0.62	1991/12/22—1992/1/4	0.26

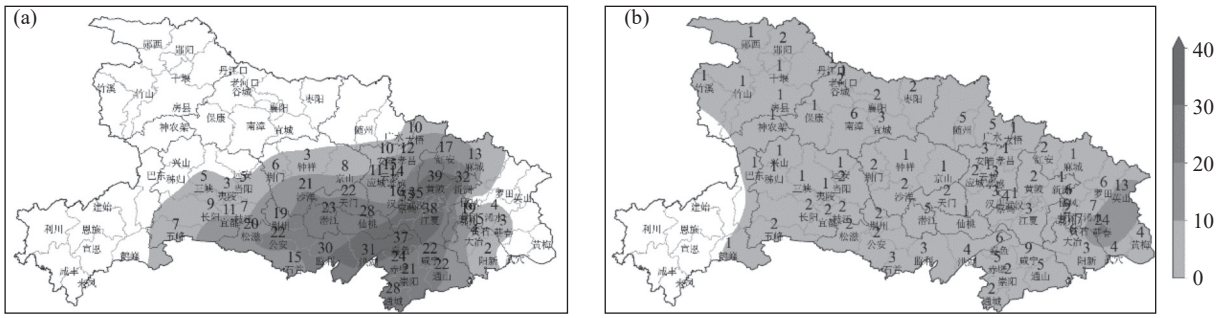


图 1 2024 年 2 月 1—7 日 (a) 和 20—26 日 (b) 冻雨量 (阴影, 单位: mm) 分布图

Fig. 1 The distribution of freezing rain amount (shaded,unit:mm) on (a) 1-7 and (b) 20-26 February 2024

位; 最大积雪深度 38 站超过 10 cm, 其中 21 站超过 15 cm。

3 “2402”过程环流异常特征

“2402”过程两个时段 500 hPa 位势高度距平分布 (图 2) 较为类似, 亚洲极涡面积明显偏大, 5 520 gpm 南界特征线已到达 40°N 附近。中纬度我国 110°E 以西为负高度距平、以东为正高度距平, 呈现典型降水型“西低东高”分布。第一个时段, 中纬度西风在巴尔喀什湖分为南北两支, 北支在贝加尔湖脊的引导下北上伸展到高纬度地区, 然后转折从东路南下, 为大范围低温雨雪冰冻天气提供较为持续的冷空气条件; 第二个时段, 贝加尔湖西侧出现切断低压, 相较第一个时段冷空气更强。

从 850 hPa 气温距平场的时间-纬度剖面图 (图 3) 可见, 1 月末至 2 月初、2 月下旬初有两次较强冷空气南下; 同时, 低纬度西太副高 (图 4a) 自 1 月下旬开始持续增强并维持异常偏强的状态长达一月余, 30 d 内西太副高强度达到历史同期最强 (图 4c), 仅次于 2016 年、超过 1998 年。期间在 1 月末和 2 月中旬末西太副高出现两次明显北抬 (图 4b), 引导暖湿气流北上, 冷暖对峙在 30°N 附近的时间正是两次持续低温雨雪冰冻过程发生的时间。

850 hPa 风距平场 (图 5) 在孟加拉湾和我国南海有偏南风异常, 表明东南、西南两支水汽均偏强, 该距平风经过湖北省后, 在黄淮地区受东路冷空气压

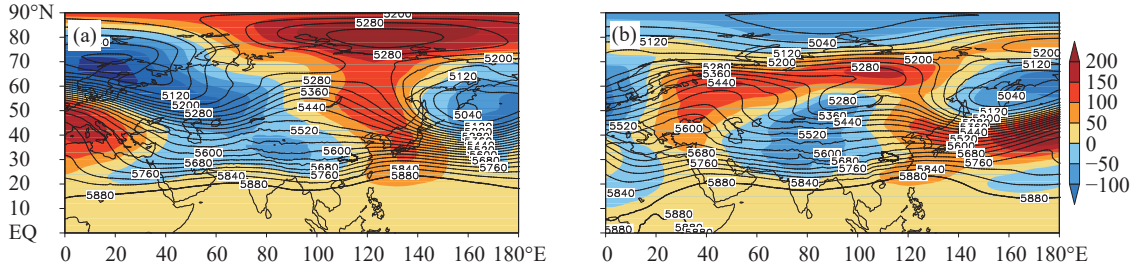


图 2 东北半球 2024 年 2 月 1—7 日 (a) 和 20—26 日 (b) 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: gpm) 和距平 (填色, 单位: gpm) 分布

Fig. 2 The distribution of 500 hPa geopotential height (contour, unit: gpm) and anomaly (shaded, unit: gpm) in the Northeast Hemisphere during (a) 1-7 and (b) 20-26 in February 2024

制, 与东路冷空气一同回流至湖北省, 此时冷暖空气交织, 大气层结复杂, 从而形成长时间的恶劣天气。

对比图 5 可见“2402”过程两次雨雪冰冻天气的区别, 首先, 第一次冷空气强度弱于第二次; 其次, 第一次印缅槽带来的西南水汽更强, 因此在雨雪相态上, 由于具有更深厚的暖层条件和更强的西南水汽, 以降冻雨为主; 第二次冷空气相对更强, 但西南水汽减弱, 以冰粒和霰为主, 期间夹杂冻雨, 雨雪相态更为复杂, 但灾害相对较轻。

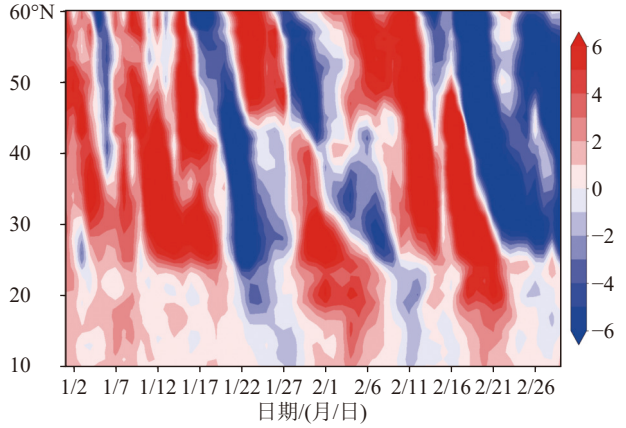


图 3 2024 年 1—2 月 110°—120°E 逐日 850 hPa 经向平均气温距平 (填色, 单位: ℃) 的时间-纬度剖面图

Fig. 3 The time-latitude profile of the daily 850 hPa meridional mean temperature anomaly (shaded, unit: ℃) along 110°-120°E from January to February 2024

4 海温异常对“2402”过程的影响

冬季出现持续低温雨雪天气, 需要北方冷空气与南方暖湿气流长时间对峙。许多研究表明, 我国南方冬季的降水与 ENSO 事件密切相关 (何溪澄等, 2006; 袁媛等, 2014), 同时也与中国近海的海温强迫有关 (宗海锋等, 2008; 钱卓蕾等, 2020), 海温异常可导致大气环流异常从而产生异常气候。下面分析海洋外强迫条件对南、北方异常环流的影响。

4.1 赤道中东太平洋海温异常及其影响

2023/2024 年冬季, 全球海洋最为显著的特征为赤道中东太平洋海温异常偏暖, 处于一次中等强度厄尔尼诺事件的峰值期, 事件强度仅次于 2014—2016 年、1982—1983 年和 1997—1998 年的三次超强厄尔尼诺事件。

通常, 厄尔尼诺年沃克环流发生翻转 (符淙斌等, 1979; 张建海和曹艳艳, 2012), 赤道中东太平洋上空会出现异常上升气流, 同时印度洋伴随升温, 西印度洋会出现略弱于中东太平洋的异常上升支, 两支

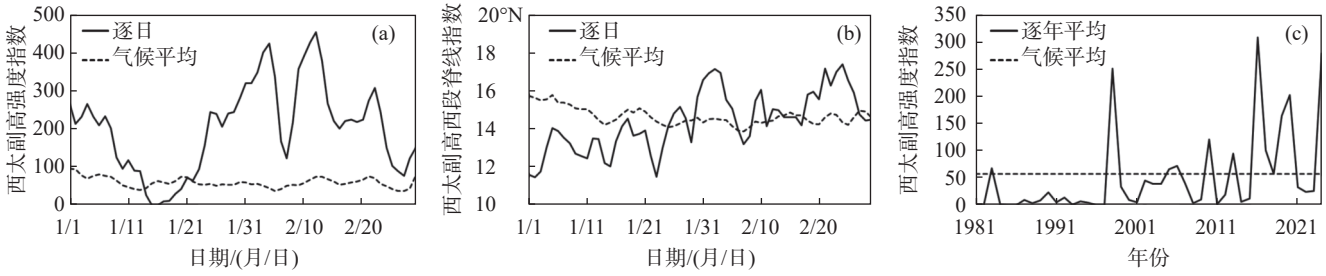


图 4 2024 年 1—2 月西太副高强度指数和气候平均 (a)、西段脊线指数和气候平均 (b) 逐日演变图, 及 1981 年—2024 年 1 月 25 日—2 月 24 日平均西太副高强度指数气候平均和逐年演变图 (c)

Fig. 4 The daily evolution of the (a) intensity index and climatological mean and (b) ridgeline index and climatological mean of the western Pacific subtropical high (WPSH) from January to February 2024, and (c) the climatological mean and annual variation of the mean WPSH intensity index from January 25 to February 24 during 1981 to 2024

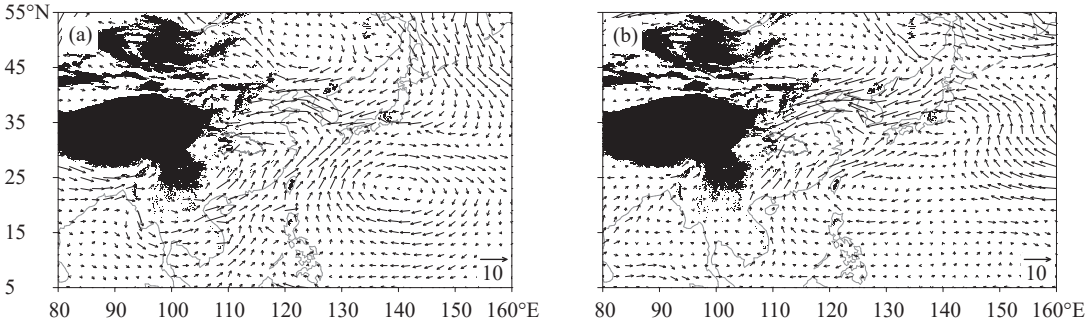


图 5 2024 年 2 月 1—7 日 (a) 和 2 月 20—26 日 (b) 850 hPa 风场距平 (矢量, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 分布 (黑色阴影区域为青藏高原, 下同)

Fig. 5 The 850 hPa wind field anomaly distribution (vector, unit:$m \cdot s^{-1}$) during (a) 1-7 and (b) 20-26 in February 2024 (The black shadow area is the Qinghai-Tibetan Plateau, same hereafter)

上升气流高空汇合后在西太平洋地区下沉，继而西太副高在异常下沉支的影响下会显著增强。

图 6 为 2016 年和 2024 年 1—2 月赤道平均印度洋-太平洋风场距平的经度-高度剖面图。与典型厄尔尼诺年 2016 年对比可见，2016 年赤道中东太平洋异常上升支偏强，同时热带印度洋异常上升支也偏强，两支气流汇合在西太平洋地区下沉，沃克环流明显减弱，同期西太副高达到历史最强；2024 年，同样在印度洋和赤道中太平洋有两支偏强的异常上升气流，但是太平洋的强度弱于 2016 年，而印度洋强于 2016 年。分析 2023/2024 年冬季沃克环流的季内变化 (图 7) 可知，2023 年 12 月，沃克环流呈现典型厄尔尼诺年的状态，但 2024 年 1 月之后，随着厄尔尼诺事件峰值的衰减，赤道中太平洋异常上升气流明显减弱，印度洋异常上升气流显著加强，表明太平洋上空的异常沃克环流正在迅速减弱，但由于印度洋持续异常的暖水，印度洋上空的异常沃克环流不减反增，对西太副高的阶段性增强起到重要作用。

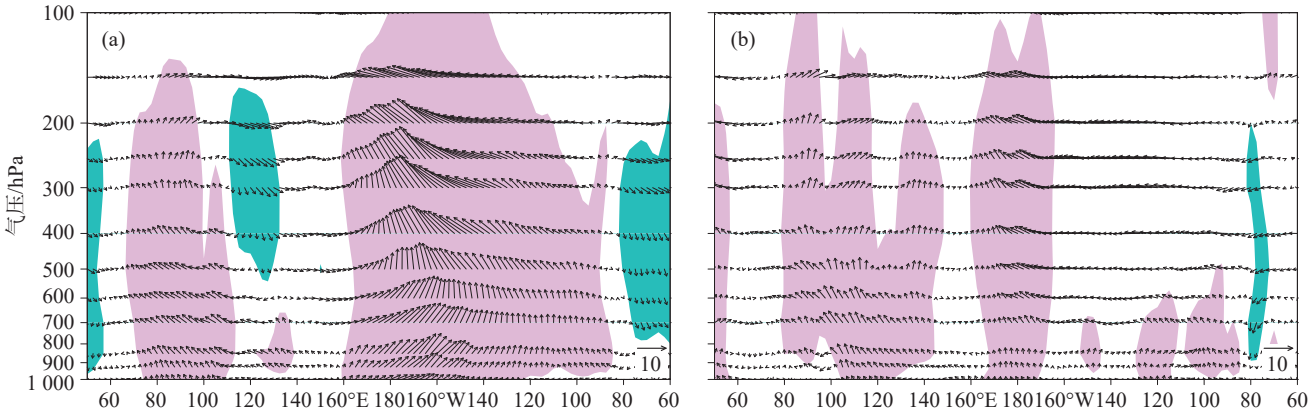


图 6 2016 年 (a) 和 2024 年 (b) 1—2 月纬向风距平 (单位：m·s^{-1}) 和垂直速度ω距平 (单位：0.01 Pa·s^{-1}) 合成(矢量，单位：0.01 Pa·s^{-1}) 的异常沃克环流 (5°S—5°N) 经度-高度剖面图 (填色区 $|\Delta\omega|\geqslant$0.01 Pa·s^{-1}，粉色表示上升运动、蓝色表示下沉运动)

Fig. 6 The longitude-height profile of the anomalous Walker circulation (5°S-5°N) synthesized (vector, unit:0.01 m·s^{-1}) from the zonal wind anomaly (unit: m·s^{-1}) and the vertical velocity ω anomaly (unit: 0.01 Pa·s^{-1}) from January to February (a) 2016 and (b) 2024 (color filling areas $|\Delta\omega|\geqslant$0.01 Pa·s^{-1}, pink indicates an upward motion and blue indicates a sinking motion)

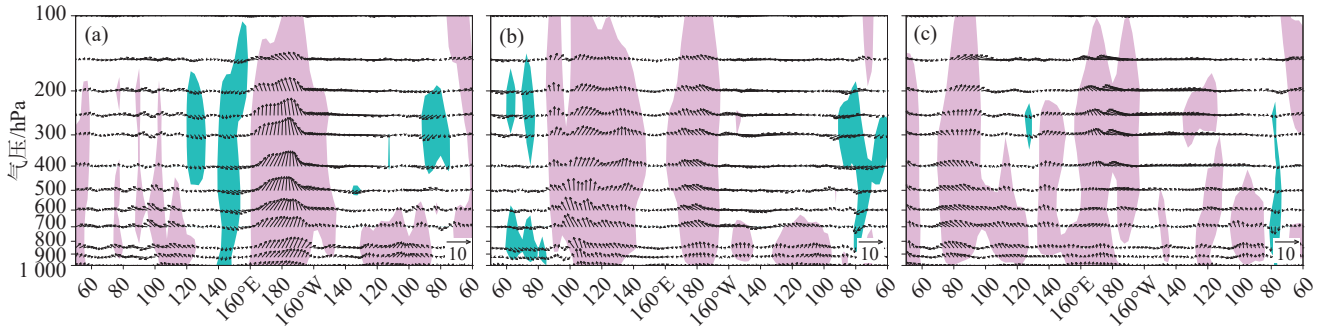


图 7 同图 6，时间分别为 2023 年 12 月 (a)、2024 年 1 月 (b)、2024 年 2 月 (c)

Fig. 7 Same as Fig. 6 , but the dates are (a) December 2023, (b) January 2024, and (c) February 2024

4.2 热带印度洋海温异常及其影响

图 8a 为 2023/2024 年冬季 IOBW 指数，2024 年 1 月末至 2 月，印度洋有一次明显的升温，与西太副高增强的时间正好一致。计算近 30 a (1995—2024 年) 2 月 IOBW 指数与 2 月西太副高强度指数的偏相关系数，排除前期 1 月 Nino3.4 的影响，偏相关系数为 0.68，通过 0.001 显著性水平检验，表明印度洋阶段性升温对西太副高的阶段性增强几乎起到决定性作用。

此外，在厄尔尼诺事件持续发展下，2023 年秋季以来，热带印度洋呈现“西暖东冷”的偶极子异常正位相状态 (图 8b)，秋冬 TIOD 指数正异常在近 30 a 中排第二位，仅次于 2019—2020 年，超过 1997—1998 年。从相关系数图 (图 9) 可见，在印度洋偶极子 (TIOD) 指数异常正位相时，低层 850 hPa 孟加拉湾至我国南海北部有西南风异常，对水汽输送十分有利。

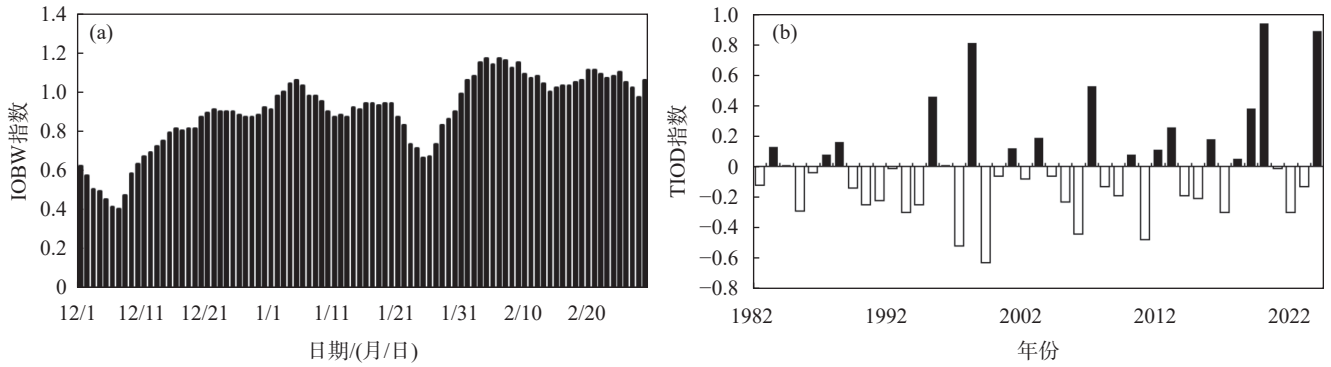


图 8 2023 年 12 月 1 日—2024 年 2 月 29 日 IOBW 指数逐日变化 (a)、1982—2024 年秋冬季 (前一年 9 月—当年 2 月) TIOD 指数逐年演变 (b)

Fig. 8 The (a) daily variation of IOBW Index from December 1, 2023 to February 29, 2024 and (b) annual variation of TIOD index for the autumn-winter period during 1982-2024 (from September of the previous year to February of the current year)

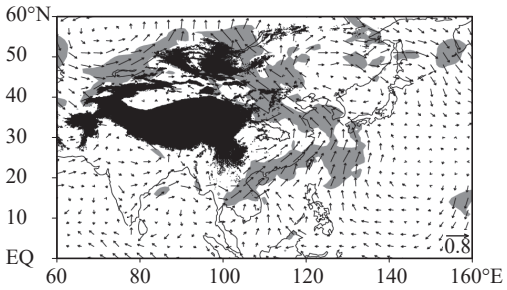


图 9 1995—2024 年 1 月 TIOD 指数与 2 月 850 hPa 风场相关系数合成的相关风场 (矢量, 单位: $m \cdot s^{-1}$, 经向风相关系数与纬向风相关系数合成) 分布图 (灰色阴影为纬向风、经向风均通过 0.1 信度检验区域)

Fig. 9 The correlation wind field (vector, unit:$m \cdot s^{-1}$, synthesis of meridional wind correlation coefficient and zonal wind correlation coefficient) synthesized by the correlation coefficients of the TIOD index in January and 850 hPa wind field in February from 1995 to 2024 (The shade of gray is the area where both the zonal wind and the meridional wind pass the 0.1 reliability test)

4.3 中国近海海温异常及其影响

2024 年 2 月中高纬 500 hPa 位势高度距平 (图 10a) 在东亚地区整体呈“两槽一脊”, 较为显著的异常是在中纬度日本海附近出现异常反气旋式环流距平。通常这一环流的存在会使得西风带气流东移受阻, 尤其在冬季, 冷空气易堆积在正距平西侧的长江流域及其以南地区, 为我国大范围雨雪天气的形成提供必要的冷空气条件。研究表明 (宗海锋等, 2008; 钱卓蕾等, 2020), 2008 年 1 月我国南方地区的持续低温雨雪冰冻天气 (图 10b)、2019 年 2 月长江中下游地区长达一月的大范围持续低温阴雨寡照天气 (图 10c), 均与这一异常环流密切相关。

分析中国近海的海温分布, 发现 2023/2024 年冬季我国黄海、日本海附近海表温度异常偏高。选取近 30 a (1995—2024 年) (122°—133°E, 32°—40°N) 区域 2 月海表平均温度与同期 500 hPa 高度

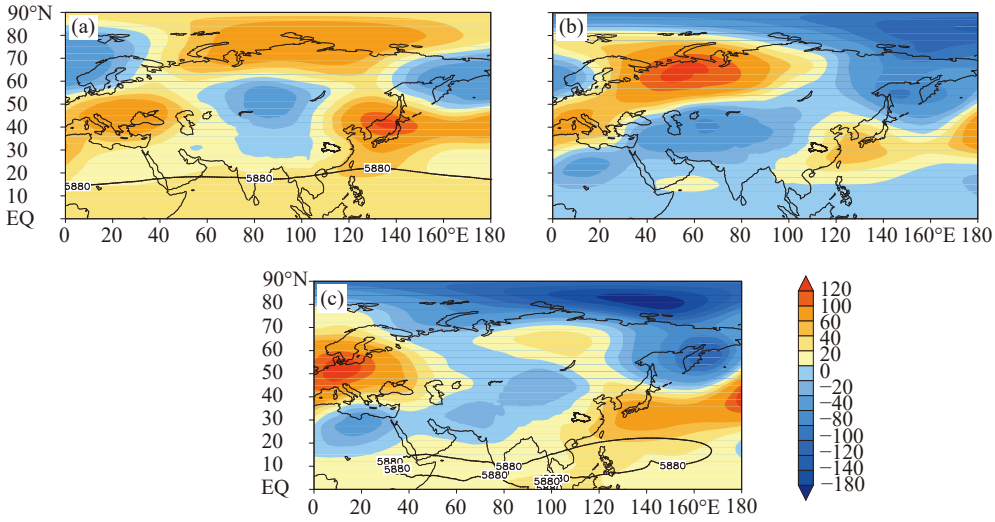


图 10 东北半球 2024 年 2 月 (a)、2008 年 1 月 (b) 和 2019 年 2 月 (c) 500 hPa 位势高度距平 (单位: gpm) 分布图

Fig. 10 The distribution of 500 hPa geopotential height anomaly (unit: gpm) in the Northeast Hemisphere in (a) February 2024 , (b) January 2008 and (c) February 2019

场进行相关分析 (图 11), 结果表明, 这一异常暖海温与贝加尔湖东南部异常反气旋存在显著正相关关系, 有利于我国东北至日本海出现正高度距平异常。

从暖海温异常区域的平均海表温度时间剖面图 (图 12) 可见, 这一区域的异常暖水在冬季维持, 其中在 1 月中旬、2 月初和 2 月中旬末, 暖水范围向西扩大至我国沿海, 同时伴随中纬度暖水向南发展增强, 而后两次暖海温增强的时间, 正是 2 月两次低温雨雪冰冻过程发生的时间, 500 hPa 日本海上空的反气旋异常 (图 13) 在前述暖海温范围扩大时, 随之有明显增强。

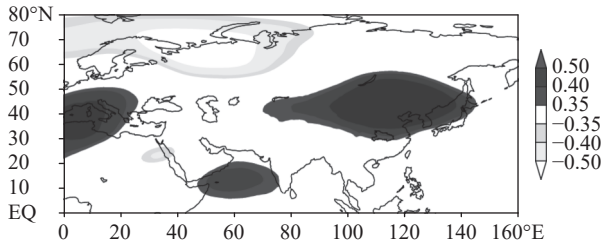


图 11 1995—2024 年 2 月 (122°—133°E, 32°—40°N) 区域平均海表温度与同期 500 hPa 位势高度相关系数图 (阴影区通过 0.05 信度检验)

Fig. 11 The correlation coefficient between the mean sea surface temperature (SST) in the region of (122°-133°E, 32°-40°N) and the 500 hPa geopotential height in February from 1994 to 2024 (the shaded area passed the 0.05 reliability test)

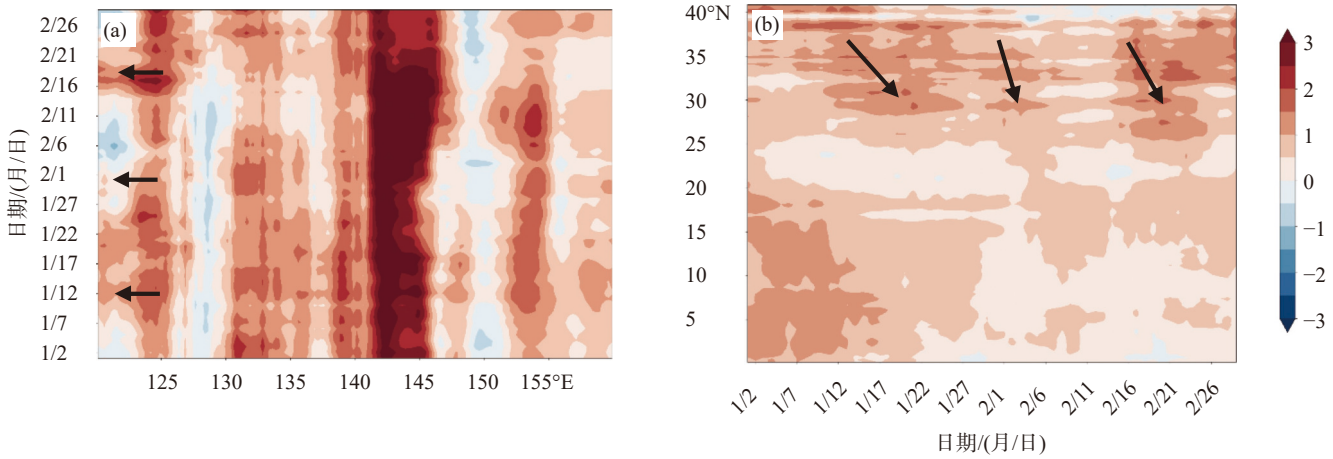


图 12 2024 年 1—2 月 32°—40°N 区域平均海表温度 (填色, 单位: ℃) 的经度-时间剖面图 (a)、122°—133°E 区域平均海表温度 (填色, 单位: ℃) 的时间-纬度剖面图 (b, 黑色箭头表示暖水传播的方向)

Fig. 12 The (a) longitude-time profile of mean SST (shaded, unit: ℃) over the region 32°-40°N and (b) time-latitude profile of mean SST (shaded, unit: ℃) over the region 122°-133°E from January to February 2024 (The black arrows indicate the transport direction of the warm water)

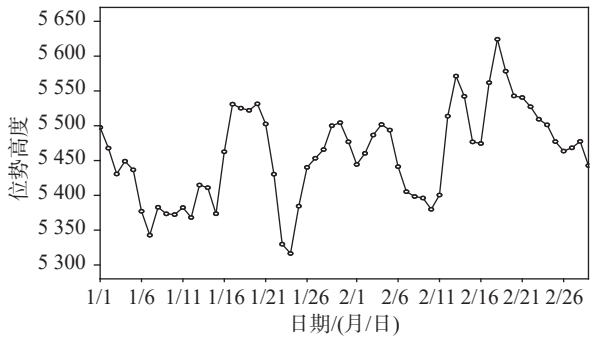


图 13 2024 年 1 月 1 日—2 月 29 日 (120°—150°E、30°—50°N) 区域平均 500 hPa 位势高度 (单位: gpm) 逐日演变图

Fig. 13 The daily variation of the average 500 hPa geopotential height (unit: gpm) in the region of (120°-150°E, 30°-50°N) from January 1 to February 29, 2024

5 结论

本文利用 1961—2024 年湖北省 82 个国家站观测、再分析及海温和环流指数资料资料, 基于改进的雨雪冰冻天气强度综合指数分析了 2024 年 2 月湖北省两次雨雪冰冻天气的异常天气特征, 在此基础上, 对其环流特征及海温的影响进行了分析, 得到如下主要结论:

(1) “2402”过程降水相态复杂, 出现了雨、冻雨、冰粒、雨夹雪、纯雪、冰雹、霰等 7 种降水相态, 历史罕见。两次过程全省累计降水量 88 mm, 达常年 2 月总降水量近 2 倍。与综合强度指数排历史第一位的“0801”过程对比, “2402”过程降水相态比“0801”过程复杂, 冻雨范围和极端性强于“0801”过程, 但是低温雨雪冰冻持续时间和积雪深度都不及 0801 过程。

(2) “2402”过程 500 hPa 位势高度距平场为有利降水的典型“西低东高”分布, 西太副高异常增强, 配合东路冷空气, 形成持续低温雨雪冰冻过程。第一次过程具有更深厚的暖层条件和更强的西南水汽,

以降冻雨为主; 第二次过程冷空气相对更强, 但西南水汽减弱, 以冰粒和霰为主, 期间夹杂冻雨, 雨雪相态更为复杂。

(3) 2023 年春季发展的一次中等偏强厄尔尼诺事件于 2023/2024 年冬季达到峰值并开始衰减, 印度洋异常增暖且呈现“西暖东冷”分布特征, 对后冬西太副高异常增强和西南水汽异常增强起到了重要作用。

(4) 我国黄海至日本海附近的异常暖海温, 在 2402 过程中也起到了重要作用, 其在日本海上空可以强迫出异常反气旋式环流, 对西风带气流东移起到一定阻挡作用, 冷空气堆积在长江流域及其以南地区, 与增强的西太副高输送的南方水汽交汇, 易形成持续的雨雪冰冻天气。

参考文献 (References):

陈璇,钟敏,陈赛男,等.2024. 2024 年 2 月初湖北极端冰冻过程的观测和成因分析[J].暴雨灾害,43(6):668−679. Chen X, Zhong M, Chen S N,et al. 2024. Observational and causal analysis of the extreme freezing in Hubei Province in early February 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6):668−679 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−094

陈正洪,史瑞琴,李兰.2008.湖北省 2008 年初低温雨雪冰冻灾害特点及影响分析[J].长江流域资源与环境,17(4):639−644. Chen Z H, Shi R Q, Li L. 2008. Analysis on the main properties of the low temperature, raining and snowing, icing disaster and its effect in Hubei in early 2008 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 17(4):639−644 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−8227.2008.04.026

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 Meteorologica Sinica,66(5):808−825 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2008.074

冯明,胡英,徐荣钦,等.2009.2008 年低温冰冻及其对湖北农业的影响[J].中国农业气象,2009,30(S1):154−156. Feng M, Hu Y, Xu R Q, et al. 2009. Analysis on low temperature and frozen and its impacts on agriculture in Hubei Province in 2008 [J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2009,30(S1):154−156 (in Chinese). doi:cnki:sun:zgny.0.2009−S1−036

符淙斌,孙翠霞,张金枝.1979.赤道海温异常与大气的垂直环流圈[J].大气科学,3(1):50−57. Fu C B, Sun C X, Zhang J Z. 1979. The atmospheric vertical circulation during anomalous periods of sea surface temperature over equatorial pacific ocean [J]. Scientia Atmospherica Sinica,3(1):50−57 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1979.01.06

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]. Meteorological Monthly,34(4):101−106 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2008.04.013

高正旭,周月华,杜良敏.2008. 2007/2008 年湖北省冬季异常低温雨雪过程成因分析[J].暴雨灾害,27(2):166−171. Gao Z X, Zhou Y H, Du L M. 2008. Causes of the anomaly low temperature rain (snow) weather in winter 2007/2008 [J]. Torrential Rain and Disaster,27(2):166−171 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2008.02.012

何溪澄,丁一汇,何金海,等.2006.中国南方地区冬季风降水异常的分析[J].气象学报,64(5):594−604. He X C, Ding Y H, He J H, et al. 2006. An analysis on anomalous precipitation in southern China during winter monsoons [J]. Acta Meteorologica Sinica,64(5):594−604 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2006.058

何溪澄,丁一汇,何金海.2008.东亚冬季风对 ENSO 事件的响应特征[J].大气科学,32(2):335−344. He X C, Ding Y H, He J H. 2008. Response characteristics of the East Asian Winter Monsoon to ENSO events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,32(2):335−344 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2008.02.12

李兰,陈正洪,周月华,等.2009.湖北省 2008 年初低温雨雪冰冻过程气候特征分析[J].长江流域资源与环境,18(3):291−295. Li L, Chen Z H, Zhou Y H, et al. 2009. Climatic features of low temperature and freezing of 2008 in Hubei Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,18(3):291−295 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−8227.2009.03.016

刘芸芸,李维京,艾秀,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]. Journal of Applied Meteorological Science,23(4):414−423 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001−7313.2012.04.004

吕春艳, 李旭, 陈军, 等.2024.我国南方两次低温雨雪天期成因对比分析[J].沙漠与绿洲气象,18(1):96−104. Lyu C Y, Li X, Chen J, et al. 2024. Comparison of causes of two low temperature rain and snow weathers in southern China [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(1):96−104 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.01.012

彭京备,孙淑清.2019. 2018 年 1 月南方雨雪天气的形成及其与冬季风异常的关系[J].大气科学,43(6):1233−1244. Peng J B, Sun S Q. 2019. Formation of rainy and snowy weather in South China in January 2018 and its relationship with the abnormal East Asian winter monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,43(6):1233−1244 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1901.18188

钱卓蕾,罗玲,马洁华,等.2020. 2018/2019 年冬季浙江罕见持续阴雨天气的环流异常与海温强迫[J].气候与环境研究,25(5):510−520. Qian Z L, Luo L, Ma J H, et al. 2020. Circulation anomaly and sea surface temperature forcing in rare continuous rainy weather in Zhejiang during the winter of 2018/2019 [J]. Climatic and Environmental Research,25(5):510−520 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2019.19060

史瑞琴,夏智宏,秦鹏程,等.2024.基于低温-雨雪-冻雨综合强度指数的湖北省冰冻事件分型及灾损评估[J].暴雨灾害,43(4):448−457. Shi R Q, Xia Z H, Qin P C, et al. 2024. Typing and disaster loss evaluation of freezing events based on the comprehensive intensity index of low temperature, rainfall/snowfall and freezing in Hubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4):448−457 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−078

孙晓娟,李驷焱,虞越越,等.2022. 1951—2017 年冬季中国南方持续性冰

冻雨雪事件的气候特征及其与环流异常的联系[J].大气科学学报,45(5):768−777. Sun X J, Li S Y, Yu Y Y, et al. 2022. Climatic characteristics of winter long-lasting freezing rain and snow events in southern China from 1951 to 2017 and their relationship with circulation anomalies [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 5(5):768−777 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201112002

万素琴,周月华,李兰,等.2008.低温雨雪冰冻极端气候事件的多指标综合评估技术[J].气象,34(11):40−46. Wan S Q, Zhou Y H, Li L, et al. 2008. A multi-index synthetic assessment method for extreme climate events of sleeting and freezing with low temperature [J]. Meteorological Monthly,34(11):40−46 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2008.11.006

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]. Meteorological Monthly,34(4):95−100 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2008.04.012

王遵娅.2011.中国冰冻日数的气候及变化特征分析[J].大气科学,35(3):411−421. Wang Z Y. 2011. Climatic characters and changes of ice-freezing days in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 35(3):411−421 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2011.03.03

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 Nino and La Nina [J]. Acta Meteorologica Sinica,72(2):237−255 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2014.014

张建海,曹艳艳.2012. 2012 年初浙江连阴雨天气的环流特征及其异常成因[J].暴雨灾害,31(4):342−350. Zhang J H, Cao Y Y. 2012. Circulation feature and the anomalous cause of the continuous rainy weather in Zhejiang province in the beginning of 2012 [J]. Torrential Rain and Disasters,31(4):342−350 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2012.04.008

周月华,郭广芬.2010.基于多指标综合指数的灾害性天气过程预评估方案[J].气象,36(9):87−93. Zhou Y H, Guo G F. 2010. Pre-evaluation method of disastrous weather progress based on multi-factor comprehensive index [J]. Meteorological Monthly,36(9):87−93 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2010.9.014

宗海锋,张庆云,布和朝鲁,等.2008.黑潮和北大西洋海温异常在 2008 年 1 月我国南方雪灾中的可能作用的数值模拟[J].气候与环境研究,13(4):491−499. Zong H F, Zhang Q Y, Bu L C H, et al. 2008. Numerical simulation of possible impacts of Kuroshio and North Atlantic sea surface temperature anomalies on the South China snow disaster in January 2008 [J]. Climatic and Environmental Research, 13(4):491−499 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2008.04.13

宗志平,马杰,张恒德,等.2013.近几十年来冻雨时空分布特征分析[J].气象,39(7):813−820. Zhong Z P, Ma J, Zhang H D, et al. 2021. Analysis on the spatial-temporal characteristics of freezing rain in recent decades [J]. Meteorological Monthly,39(7):813−820 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2013.07.002

Klein S A, Soden B J, Lau N C. 1999. Remote sea surface temperature variations during ENSO: evidence for a tropical atmospheric bridge [J]. Journal of Climate,12:917−932

Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. Nature,401:360−363

(责任编辑 张 文)