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

长江以南和东北冬季湿冷型复合极端天气的对比

肖擎曜 沈璐炜 李健颖 李浩然

Comparative analysis of wet-cold compound extremes between south of the Yangtze River and Northeastern China during the winter

XIAO Qingyao，SHEN Luwei，LI Jianying，LI Haoran

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-148

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

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月湖北省两次雨雪冰冻天气特征及海温影响分析

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

暴雨灾害. 2025, 44(1): 31-40 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-110

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

2024年春运期两次极端雨雪冰冻天气过程对比分析

Comparison of two extreme rainfall/snowfall and freezing weather events during the Spring Festival transportation period in 2024

暴雨灾害. 2024, 43(4): 371-383 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-095

2024年初湖南两次区域性低温雨雪冰冻天气的成因对比

Comparison of causes of two regional rainfall/snowfall and freezing events with low temperatures in Hunan in early 2024

暴雨灾害. 2024, 43(6): 680-692 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-081

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

关注微信公众号，获得更多资讯信息

肖擎曜,沈璐炜,李健颖,等.2026.长江以南和东北冬季湿冷型复合极端天气的对比[J].暴雨灾害,45(2):206−217. XIAO Qingyao, SHEN Luwei, LI Jianying, et al. 2026. Comparative analysis of wet-cold compound extremes between south of the Yangtze River and Northeastern China during the winter [J]. Torrential Rain and Disasters,45(2):206−217 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−148

长江以南和东北冬季湿冷型复合极端天气的对比

肖擎曜[1, 2], 沈璐炜[2], 李健颖[1, 3], 李浩然[3]

(1. 全国暴雨研究中心, 武汉 430205; 2. 北京玖天气象科技有限公司, 北京 100081; 3. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘　要: 利用 1962—2022 年基于中国台站观测的高分辨率格点化逐日 2 m 气温、相对湿度以及降水资料, 客观定义有利于低温雨雪冰冻天气形成的湿冷型复合极端天气, 对比分析长江以南和东北地区湿冷型复合极端天气的异同。结果表明: (1) 长江以南是我国湿冷型复合极端天气高发区, 年均发生频次达 30 d 以上; 东北地区为另一高发中心, 年均发生频次达 10 d 以上。(2) 长江以南湿冷型天气以中等强度降温和高湿度为主要特征, 平均持续时间 5.2 d, 影响范围约 30 万 km^2; 东北地区以强降温和中等湿度为主, 平均持续时间 3.3 d, 影响范围约 38.3 万 km^2。(3) 长江以南区域性湿冷型复合极端事件的强度和影响范围以年际变化为主要特征, 东北地区区域性湿冷型复合极端事件的强度和影响范围近 30 a (1992—2021 年) 相比前 30 a (1962—1991 年) 分别增加了 100% 和 43.5%, 相对湿度变率的显著增大是造成湿冷型复合极端事件增加的重要原因之一。上述研究结果有助于加深对我国南北地区湿冷型复合极端天气差异的认识。

关键词: 湿冷型复合极端天气; 低温雨雪冰冻; 相对湿度变率; 长江以南; 东北

中图法分类号: P429　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−148

Comparative analysis of wet-cold compound extremes between south of the Yangtze River and Northeastern China during the winter

XIAO Qingyao[1, 2], SHEN Luwei[2], LI Jianying[1, 3], LI Haoran[3]

(1. *Heavy Rainfall Research Center of China*, *Wuhan* 430205; 2. *Beijing Jiutian Weather Technology Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100081; 3. *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081)

Abstract: Based on high-resolution gridded daily observations of 2-meter air temperature, relative humidity, and precipitation from Chinese meteorological stations during 1962-2022, this study objectively defines wet-cold compound extremes (WCCEs) conducive to low-temperature freezing rain and snow weather, and further compared the WCCEs between northeastern China and south of the Yangtze River. The results are as follows. (1) WCCEs frequently occur over south of the Yangtze River, with an average frequency exceeding 30 days per year. Northeastern China is another hotspot of WCCEs, with an average occurrence of more than 10 days. (2) The WCCEs south of the Yangtze River are characterized by moderate temperature drop and high humidity, with an average duration of 5.2 days and affected area of approximately 300 000 km^2. In contrast, northeastern China experiences stronger low temperature and moderate humidity, with a shorter average duration of 3.3 days and smaller affected areas (383 000 km^2). (3) The intensity and spatial extent of regional WCCE events south of the Yangtze River mainly exhibit interannual variability. By contrast, the intensity and spatial extent of regional WCCE events in northeastern China have increased by 100% and 43.5% over the past 30 years (1992-2021) relative to the preceding 30-year period (1962-1991), respectively. This intensification of WCCE is intimately associated with the increased variability of relative humidity in this region. The findings of this study are significant in improving our understanding of the differences in WCCE between southern and northern regions of China.

Key words: wet-cold compound extreme events; disastrous weather of rain; variability of relative humidity; south of the Yangtze River; Northeastern China

收稿日期: 2025−08−06; **定稿日期**: 2026−01−20

资助项目: 中国气象科学研究院科学发展基金项目 (2024KJ029); 暴雨研究开放基金项目 (BYKJ2024Q15)

第一作者: 肖擎曜, 主要从事极端天气对能源系统的影响研究。E-mail: xiaoqingyao@jtmet.com

通信作者: 李健颖, 主要从事极端事件机理及影响研究。E-mail: lijianying@cma.gov.cn

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

引　言

冬季极端低温是指以大幅度降温为标志的典型极端天气, 且常常与降水相伴发生。当气温接近 0 ℃时, 降水多以冻雨、冻毛毛雨、降雪、雨夹雪和霰等固态降水的形式出现 (Bernstein, 2000; Stewart et al., 2015), 与极端低温结合, 形成低温雨雪冰冻天气。低温雨雪冰冻天气对农业、交通、能源均造成了严重的威胁 (Yeh et al., 2018; Herring et al., 2021; Dai et al., 2022)。2008 年冬季, 中国南方 20 多个省市遭遇了持续时间长达 20 多天的低温雨雪冰冻灾害 (温泉沛等, 2024), 交通电力等设施遭受重创, 直接经济损失达 1 000 多亿元 (Sun and Zhao, 2010)。2020/2021 年冬季, 覆盖东亚至北美的强寒潮使得美国德克萨斯州气温下降至-18 ℃, 造成该地区电网崩溃 (Dai et al., 2022)。值得注意的是, 低温雨雪冰冻天气还以高湿度为重要特征。高湿度会加剧人体对寒冷环境的反应, 还会显著加剧寒冷应急反应引起的症状 (Yu et al., 2021; Zhang et al., 2023), 进一步放大极端低温对人体健康的不良影响。

鉴于低温雨雪冰冻天气的形成依赖于低温和高湿度 (降水) 的同时发生, 需要采用温度和湿度联合对其进行刻画。以往研究中, 研究者提出了湿球温度、热应力指数和湿球黑球温度等多种温度和湿度结合的指标来表征温湿复合型极端事件, 并在极端高温-高湿事件的变化特征、形成机制以及未来预估方面开展了广泛应用 (Li et al., 2020; Luo et al., 2022)。对于低温雨雪冰冻事件, 若使用上述温度和湿度结合的指标, 将低于其绝对或相对阈值作为低温-高湿复合型极端事件的判据, 可能会出现单由极端低温或极端高湿度造成的低值情况, 无法有效地考虑低温和高湿度的同时发生。因此, 已有研究主要采用温度和降水组合定义湿冷型天气 (Qian et al., 2014; 史瑞琴等, 2024)。Zhang和 Hsu (2025) 的最新研究工作则基于气温和降水双变量判据, 采用绝对阈值和相对阈值结合的方法, 定义了湿冷型复合极端天气, 并成功识别出了造成 2008 年、2018 年、2021 年冬季低温雨雪冰冻灾害的湿冷型复合极端事件。

中国的低温雨雪冰冻天气分布较为广泛, 其中, 长江以南作为频发区域受到了广泛的关注 (李尚峰等, 2018; 韩永秋等, 2021; 石艳等, 2023; 杜小玲等, 2024; 吕春艳等, 2024)。研究表明, 长江以南的持续性低温雨雪冰冻天气主要受到乌拉尔山阻塞高压 (Luo et al., 2016)、欧亚大陆波列 (Song et al., 2016; Lin and Cheung, 2022)、北极涛动 (Jeong and Ho, 2005)、南支槽 (张博和张芳华, 2024) 以及热带季节内振荡 (Zhang and Hsu, 2025) 等系统共同作用。此外, 东北地区也是低温雨雪冰冻天气高发区 (王颖等, 2013)。在全球气温不断升高、北半球尺度上冬季极端冷事件发生频次呈显著减少趋势的背景下, 近几年东北地区破纪录低温雨雪冰冻灾害频发, 给电力、通讯、交通运输等行业造成严重影响。例如, 2020 年 11 月, 东北地区出现强低温雨雪天气, 多站日降温幅度突破历史极值, 最大降温幅度超 14 ℃, 部分积雪深度超 30 cm, 造成铁路大面积停运、机场大量航班取消。2021 年 11 月 7—9 日东北再次出现大范围罕见冰冻雨雪和大风并发的极端天气, 引发严重冻雨灾害, 多县出现不同程度的电线结冰, 造成设备覆冰故障和倒杆断线 (高清源等, 2024; 杜晓丹等, 2024)。然而, 以往对于东北地区低温雨雪冰冻天气的研究相对匮乏, 多基于个例分析 (苗青等, 2016)。东北地区的冻雨主要由冰相融化机制造成, 表现为地面冷层-中层暖层-高层冷层“三明治”温度结构特征 (多奕霖等, 2025)。其中, 北极极涡分裂南下引导的冷空气入侵形成的“冷垫”与温带气旋有关的暖湿气流输送形成的“融化层”是造成东北湿冷型复合极端天气的重要原因 (王宁等, 2023)。造成东北地区低温雨雪冰冻天气的温度、湿度和降水等特征与长江以南的是否存在差异及其背后的物理原因还亟待探究。

因此, 本文将客观定义有利于低温雨雪冰冻天气形成的湿冷型复合极端天气和事件, 并对比分析长江以南和东北两个低温雨雪冰冻高风险地区的湿冷型复合极端天气的温湿配置、持续时间、影响范围等的异同。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文所用资料包括: (1) 中国气象数据共享网的 CN05.1 逐日格点化降水、相对湿度和 2 m气温数据。该数据集是基于中国 2 416 个气象台站的观测资料经过薄盘样条函数法 (ANUSPLIN) 和角距权重方法 (ADW) 插值所得的高分辨率逐日格点化数据集, 其水平分辨率为 0.25°×0.25° (吴佳和高学杰, 2013), 时间段为 1962—2022 年。该数据集的气温和降水在中国东部地区与台站观测差别较小, 已被广泛用于探究中国东部地区气温和降水的变化特征和机理 (Ge et al., 2023; Guo et al., 2023; Li et al., 2024), 本文关注的长江以南和东北地区 (图 1 紫色框型范

围) 都位于上述误差较小的中国东部, 因此, 选取该数据集开展湿冷型复合极端天气的研究是合理的。(2) 1979—2022 年日本气象厅开发的全球再分析资料 JRA55 数据集 (Kobayashi et al., 2015), 时间分辨率为 6 h, 空间分辨率为 1.25°×1.25°, 包括从 1 000 hPa 到 10 hPa 共 37 层等压面上的位势高度、风场、温度、比湿、相对湿度等气象要素, 用于分析湿冷型复合极端事件的大尺度环流特征。

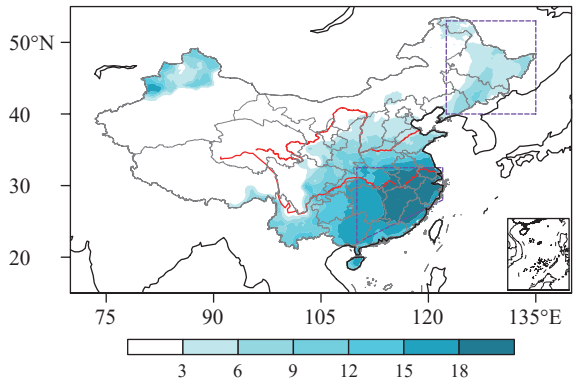


图 1 1962—2022 年冬季中国地区湿冷型复合极端天气的年平均发生频次 (填色, 单位: d) (上下紫色虚线框分别为东北和长江以南地区, 下同; 上下红色实线分别为长江和黄河, 下同)

Fig. 1 (a) Mean annual occurrence (shading, unit: days) of wet-cold compound extremes over China during the winters from 1962 to 2022 (The purple dashed boxes highlight the two key regions of this study. The red solid lines denote the locations of the Yangtze River and Yellow River, the same in the following figures)

1.2 研究方法

1.2.1 湿冷型复合极端天气、事件的定义

本文在 Zhang 和 Hsu (2025) 提出的湿冷型复合极端天气定义的基础上, 进一步引入相对湿度, 采用逐日 2 m 气温、相对湿度和降水三个变量定义极端天气。首先设定 6 个条件: (1) 逐日 2 m 气温低于 10 百分位阈值; (2) 逐日 2 m 气温低于 1 ℃; (3) 逐日降水量高于 85 百分位阈值; (4) 逐日降水大于 1 mm·d^{-1}; (5) 逐日相对湿度高于 85 百分位阈值; (6) 逐日相对湿度高于 80%。然后, 展开判断, 当某一格点在某一日同时满足以上 6 个条件则认为该格点在当日出现有利于低温雨雪冰冻发生的湿冷型复合极端天气。其中, 逐日 2 m 气温 (降水或相对湿度) 的百分位相对阈值是通过对 1962—2022 年逐日 (1 月 1 日—12 月 31 日) 2 m 气温 (降水或相对湿度) 前后各 10 d (例如 3 月 22 日, 在 1962—2022 年每一年挑出其前后 10 d, 也就是 3 月 12—4 月 1 日) 共计 1 281 d 样本进行排序确定该日的 2 m 气温 (降水或相对湿度)10 (85) 百分位阈值。若某一个格点连续 3 d 及以上出现湿冷型复合极端天气, 则将其定义为一次湿冷型复合极端事件。

1.2.2 湿冷型复合极端事件及其相关定义

在本文关注的长江以南地区 (110º–122ºE, 22º–32.5ºN) 和东北地区 (122.5º–135ºE, 40º–53ºN), 当某一日区域内三分之一以上的格点出现湿冷型复合极端天气, 则认为该日发生了区域性湿冷型复合极端天气。

当长江以南 (东北) 地区连续 3 d 或以上出现区域性湿冷型复合极端天气, 且相邻 2 d 出现湿冷型复合极端天气的格点重合度在 10% 以上, 则将其定义为一次区域性湿冷型复合极端事件。

将区域性湿冷型复合极端事件的持续天数定义为其持续时间 (Duration) (Li et al., 2024; Zhang and Hsu, 2025)。计算区域性湿冷型复合极端事件中每日湿冷型复合极端天气的发生面积, 将该面积的多日平均定义为该区域性湿冷型复合极端事件的发生面积 (Area)。

参考 Zhang 和 Hsu (2025), 以标准化相对湿度和标准化气温的差值来衡量湿冷型复合极端天气的强度, 并计算区域性湿冷型复合极端事件中出现湿冷型复合极端天气格点的平均强度 (Intensity)。在此基础上, 计算区域性湿冷型复合极端事件中出现湿冷型复合极端天气格点的累积强度 (Magnitude=Intensity×Area×Duration, 单位为 10 万 km^2·d), 用于衡量其危险性。在 1962—2022 年冬季 (当年 11 月至次年 3 月), 逐年统计长江以南地区和东北地区的区域性湿冷型复合极端事件, 进而考察其平均持续时间、强度、累积强度和发生面积的变化特征。

为了考察新引入的相对湿度的阈值对湿冷型复合极端天气、极端事件的持续时间和强度等定义的影响, 增加逐日相对湿度 4 种不同阈值的对比: (1) 相对阈值提高至 90 百分位; (2) 相对阈值降低至 75 百分位; (3) 绝对阈值下降至 70%; (4) 绝对阈值上升至 90%。通过计算发现, 不同阈值方案的结果较为一致地指出长江以南和东北地区是湿冷型复合极端天气的高发地区。同时, 对区域性湿冷型复合极端天气的格点占比和重合度阈值进行了测试, 在上述 4 种阈值方案下进一步将湿冷型复合极端事件的持续时间放宽至 2 d, 区域性湿冷型复合极端事件的格点重合度放宽为 5%。采用不同阈值识别的长江以南和东北地区的区域性湿冷型复合极端事件的变化特征高度一致, 这说明本文所展示结果不依赖于阈值选取。

2 不同地区湿冷型复合极端天气的对比

2.1 湿冷型复合极端天气的空间分布

图 1 给出 1962—2022 年冬季我国湿冷型复合极端天气年平均发生频次, 从中可见, 长江以南地区(紫色框) 是我国湿冷型复合极端天气高发区, 浙江、江西、湖南以及贵州部分地区发生频次达 30 d 以上, 这些区域也是我国低温雨雪冰冻灾害高发地区 (杜小玲等, 2024; 温泉沛等, 2024)。2016 年 1 月 21—25 日, 我国南方出现一次大范围低温雨雪冰冻天气过程, 贵州中南部、湖南中部及福建中部出现冻雨, 最大积雪深度达 40 cm, 雪线还越过南岭南下至 1951 年有气象记录以来最南端, 广州城区还出现了有气象记录以来第一次降雪 (Liao et al., 2020)。这次低温雨雪冰冻天气对应长江以南大范围的持续性湿冷型复合极端天气, 56% 的区域面积出现湿冷型复合极端天气 (图 2a)。历史上其他两次长江以南低温雨雪冰冻天气也与湿冷型复合极端天气有较好的对应关系 (表 1), 说明本文定义的湿冷型复合极端天气对中国南方低温雨雪冰冻天气有很好的刻画效果。

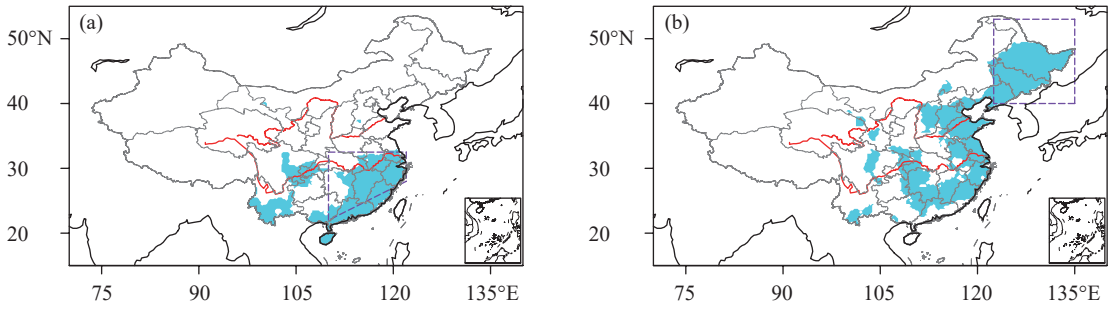


图 2 2016 年 1 月 21—25 日长江以南地区 (a) 和 2021 年 11 月 6—11 日东北地区 (b) 湿冷型复合极端天气分布
(蓝色表示该格点发生至少 1 d 极端天气)

Fig. 2 Occurrence of wet-cold compound extremes during (a) the extensive freezing rain and snow disaster in southern China on January 20-25, 2016, and (b) the large-scale freezing rain and snow disaster in northeastern China on November 6-11, 2021 (Blue shading indicates grid points where wet-cold compound extremes occurred)

表 1 典型低温雨雪冰冻过程中出现湿冷型复合极端天气的面积比例 (%)

Table 1 The proportion (%) of the area affected by wet-cold compound extreme weather during the typical low-temperature freezing rain and snow event

发生区域	发生时段	出现湿冷型复合极端天气的面积比例/%	参考文献
长江以南	2008年1月24日—2月2日	78.9	纪立人等, 2008
	2011年1月16—20日	49.0	Zhang and Hsu, 2025
	2016年1月21—25日	56.0	Liao et al., 2020
东北	2013年11月17—20日	65.8	范可等, 2024
	2020年11月17—20日	41.8	王宁等, 2023
	2021年11月6—11日	66.6	高清源等, 2024

值得注意的是, 在新疆北部以及东北三省, 每年冬季也可出现累计 10 d 以上的湿冷型复合极端天气 (图 1)。例如, 在 2021 年 11 月 6—11 日, 东北地区大范围的罕见冰冻雨雪灾害引起多地不同程度的电线结冰, 造成设备覆冰故障甚至倒杆断线 (杜晓丹等, 2024; 高清源等, 2024)。本文挑选历史上造成严重影响的三次东北低温雨雪冰冻灾害为例 (表 1), 检验湿冷型复合极端事件对东北地区的刻画能力。图 2b 显示东北地区的雨雪冰冻灾害也出现在当地湿冷型复合极端天气中, 平均约 58% 的区域面积受湿冷型复合极端天气影响, 说明该湿冷型复合极端天气的定义对东北地区低温雨雪冰冻天气也具有较好的指示意义。

2.2 湿冷型复合极端天气的温湿条件对比

长江以南和东北地区的湿冷型复合极端天气的温度和湿度组合配置存在差异。东北地区的湿冷型复合极端天气的平均降温幅度较大, 可达−7 ℃, 而长江以南地区的湿冷型复合极端天气的平均降温幅度相对较小, 不超过−4 ℃ (图 3d)。冬季, 由于东北地区平均气温本就明显低于长江以南地区, 东北地区湿冷型复合极端天气平均气温在−10 ℃ 以下, 而长江以南地区湿冷型复合极端天气平均气温为−2~0 ℃

(图 3a)。长江以南地区湿冷型复合极端天气相对湿度变化幅度与东北地区相当, 均为 10% 左右 (图 3e)。但由于长江以南地区气候态水汽供应更加充足, 该地区湿冷型复合极端天气相对湿度可达 90% 以上, 部分区域超过 95%, 而东北地区湿冷型复合极端天气相对湿度在 85% 左右 (图 3b)。因此, 长江以南地区湿冷型复合极端天气降水量显著高于东北地区 (图 3c 和 3e)。

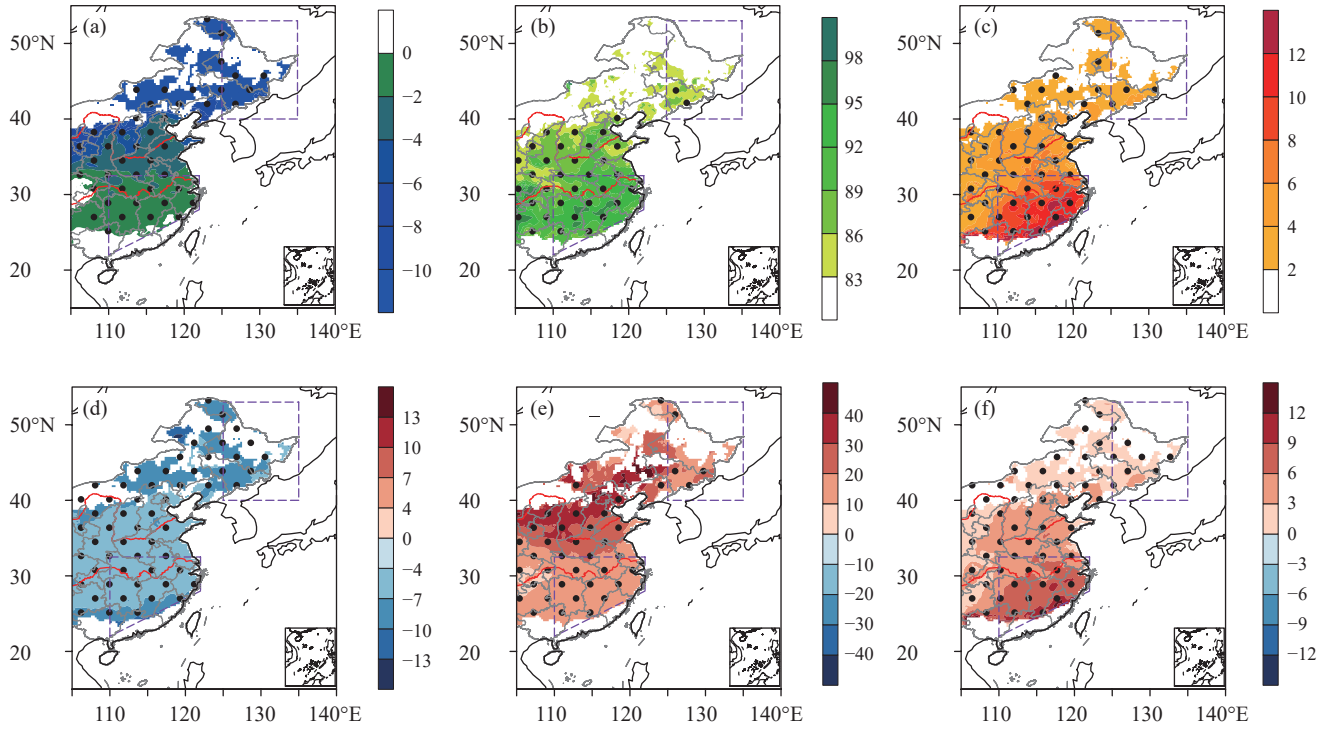


图 3 1962—2022 年冬季中国东部发生湿冷型复合极端天气时的温度 (a, 填色, 单位: °C)、相对湿度 (b, 填色, 单位: %) 和降水 (c, 填色, 单位: mm·d^{-1})。图 (d)—(f) 同图 (a)—(c), 但为温度 (d)、相对湿度 (e) 和降水 (f) 相对于气候态的距平场 (打点区域表示异常值通过 0.05 显著性水平检验, 下同)

Fig. 3 Patterns of temperature (a, shading, unit: °C), relative humidity (b, shading, unit: %), and precipitation (c, shading, unit: mm·day^{-1}) conditioned on the wet-cold compound extreme events in eastern China during the winters from 1962 to 2022. Panels (d)—(f) show the corresponding anomaly composites (Dotted areas indicate that the composited result passes the 0.05 confidence level test)

图 4 进一步给出长江以南和东北地区出现区域性湿冷型复合极端天气时区域平均的气温和相对湿度的散点图和概率分布。长江以南地区出现区域性湿冷型复合极端天气的气温主要分布在−4~0 ℃ 范围, 对应中等水平降温, 即 85% 的气温异常位于 0.6~1 倍标准差之间 (图 4)。而东北地区出现区域性湿冷型复合极端天气的气温分布于−26~−6 ℃, 对应更强降温, 85% 的气温异常位于 1~1.5 倍标准差之间 (图 4)。基于 K-S 检验 (Massey, 1951), 长江以南和东北地区标准化气温异常的概率分布在 95% 显著性上可以显著的分离, 说明东北地区的湿冷型复合极端天气的气温以及降温幅度显著低于长江以南地区。

对于湿度条件, 长江以南地区出现区域性湿冷型复合极端天气的相对湿度分布于 88%~94% 之间的范围, 对应着中等强度的湿度异常增加 (图 4)。而东北地区的区域性湿冷型复合极端天气对应的相对湿度异常分布较为分散, 较为均匀地分布于 0.6~2 倍标准差的范围 (图 4)。但该地区冬季气候较干, 湿冷型复合极端天气发生在 80%~85% 的相对湿度范围内 (图 3b)。东北以及长江以南地区相对湿度的概率分布同样在 95% 的显著性水平上是显著分离的, 说明东北地区的湿冷型复合极端天气的相对湿度显著低于长江以南地区。

总体而言, 长江以南地区湿冷型复合极端天气以中等强度降温、高湿度、强降水为主要特征, 而东北地区湿冷型复合极端天气则以强降温、中等湿度和弱降水为主。

2.3 湿冷型复合极端天气的大尺度环流对比

为进一步考察上述两个地区湿冷型复合极端天气的差异来源, 图 5 和图 6 分别给出二者的大尺度环流差异分布。

长江以南地区湿冷型复合极端天气发生时, 欧亚大陆近地面受大范围高压异常控制, 其东侧的异常偏北风引导高纬度冷空气向南入侵 (图 5a), 造成

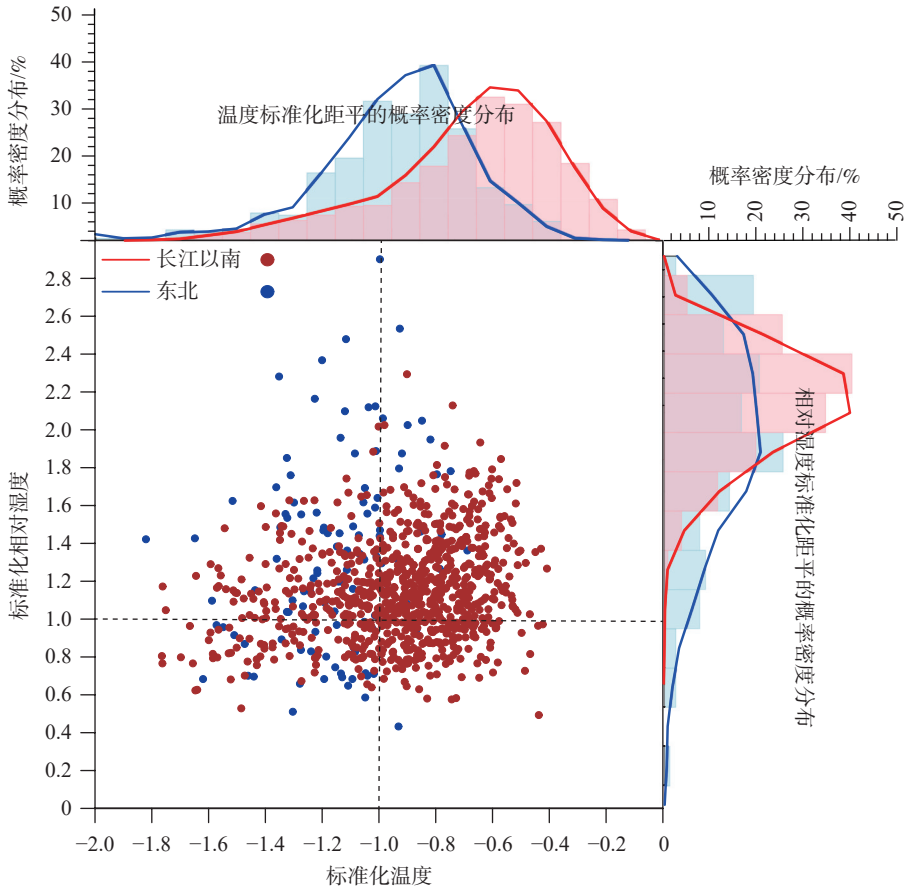


图 4 1962—2022 年冬季长江以南地区 (红点) 和东北地区 (蓝点) 湿冷型复合极端天气的标准化温度 (单位: °C) 和相对湿度 (单位: %) 距平散点图, 直方图和折线图展示了长江以南地区 (红色) 和东北地区 (蓝色) 湿冷型复合极端天气温度和相对湿度标准化距平的概率密度 (单位: %) 分布

Fig. 4 Scatter plot of standardized temperature (unit: °C, x-axis) and relative humidity (unit: %, y-axis) anomalies for wet-cold compound extremes during winters from 1962 to 2022 over south of Yangtze River (red dots) and northeastern China (blue dots), the histograms and lines of the probability distributions (unit: %) of temperature (unit: °C) and relative humidity (unit: %) for these extremes over the south of Yangtze River (red) and northeastern China (blue)

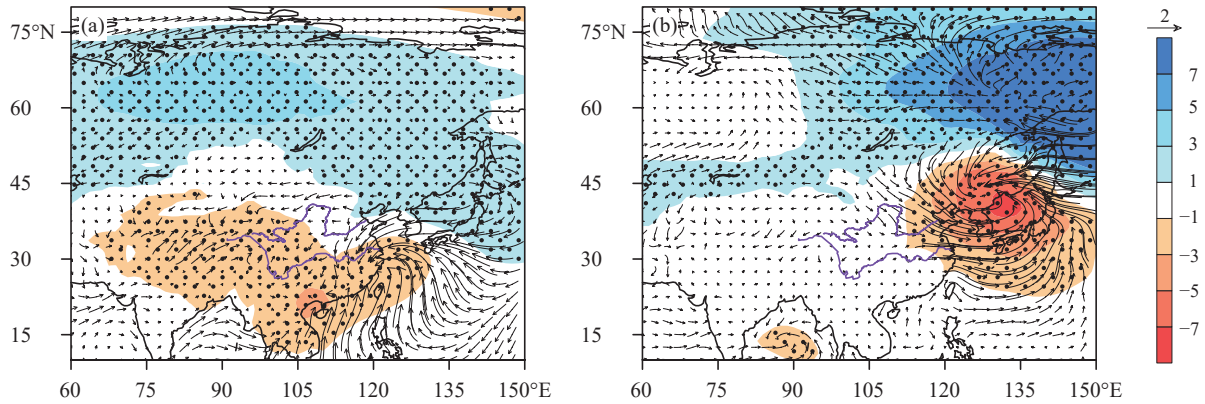


图 5 1962—2022 年冬季海平面气压 (填色, 单位: hPa) 和水平风场 (矢量, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 相对于其逐日气候态的异常场在长江以南地区 (a) 和东北地区 (b) 区域性湿冷型复合极端天气过程中的合成图

Fig. 5 Composites of anomalies (relative to the daily climatology) of sea-level pressure (color scales, unit: hPa) and horizontal wind field (vectors, unit: $m \cdot s^{-1}$) during the winters from 1962 to 2022, conditioned on the wet-cold compound extremes over (a) the region south of the Yangtze River and (b) the Northeast China

长江以南近地面异常低温 (图 3d)。对流层低层, 准纬向偶极型涡旋控制亚洲低纬度地区, 其中, 异常气旋性环流控制河套地区, 而日本海受异常反气旋性环流控制。河套气旋南部异常偏西风加强了来自孟

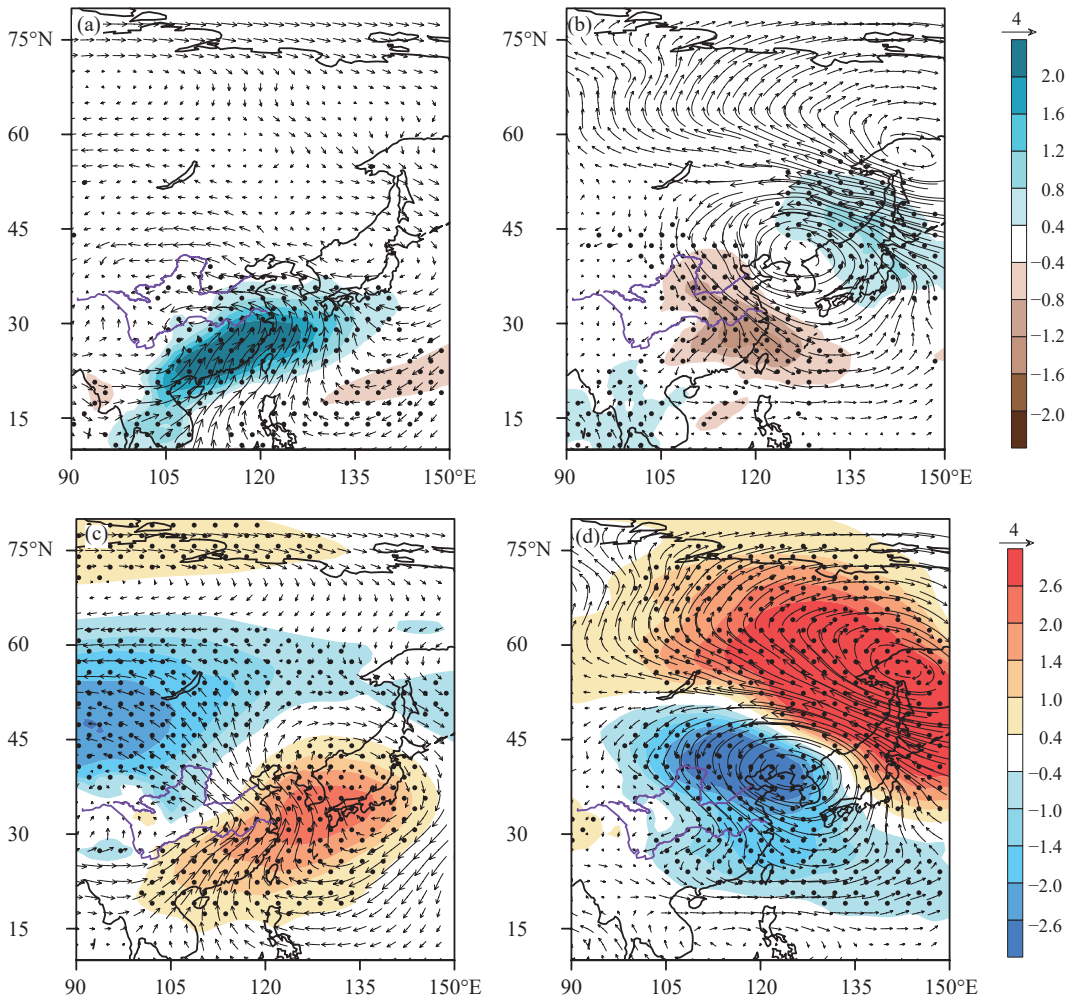


图 6 1962—2022 年冬季 850 hPa 比湿 (填色, 单位: g·kg^{-1}) 和水平风场 (矢量, 单位: m·s^{-1}) 相对于其逐日气候态的异常场在长江以南地区 (a) 和东北地区 (b) 区域性湿冷型复合极端天气过程中的合成图, (c) 和 (d) 同 (a) 和 (b), 但为 700 hPa 温度 (填色, 单位: K) 和水平风场

Fig. 6 Composites of anomalies (relative to the daily climatology) of 850 hPa specific humidity (color scales, unit: g·kg^{-1}) and horizontal wind field (vectors, unit: m·s^{-1}) during the winters from 1962 to 2022, conditioned on the wet-cold compound extremes over (a) the region south of the Yangtze River and (b) the Northeast China. The (c) and (d) are same with (a) and (b) but for 700 hPa temperature (color scales, unit: K) together with the horizontal wind

加拉湾地区的暖湿气流输送, 菲律宾海异常偏南风也将南海、西北太平洋的大量水汽输送至长江以南地区, 造成该地区低层异常暖湿层 (图 6a 和图 6c)。这种逆温层结正是造成长江以南地区低温雨雪冰冻多发的冰相融化机制的重要特征。

东北地区的湿冷型复合极端天气发生时, 近地面大尺度环流也呈现经向偶极型特征, 其中鄂霍茨克海异常高压东侧异常北风加强了高纬冷空气向东北地区的南下入侵 (图 5b), 造成该处强“冷垫”(图 3d)。控制朝鲜半岛的异常气旋加强了来自洋面的暖湿气流输送 (图 6b), 造成东北地区中低层异常暖湿层 (图 6b 和 6d), 这也是该处冻雨形成所需的融化层的重要来源。这与王宁等 (2023)、多奕霖等 (2025) 基于个例指出的东北冻雨是中高纬环流引导的南下冷空气与中低纬环流系统引导的向北暖湿气流输送造成的冰相融化机制一致。值得注意的是, 图 6 显示, 长江以南地区湿冷型复合极端天气的低层水汽异常强度较东北地区更强, 而东北地区近地面高压异常以及冷平流有关的偏北风异常均强于长江以南地区, 这可能是造成长江以南湿冷型复合极端天气以中等强度降温和高湿度为主要特征, 而东北地区湿冷型复合极端天气则表现为以强降温和中等湿度为主的重要原因。未来还需要进一步开展有关定量动力学诊断分析, 从而进一步认识三维大尺度环流如何调控温度和水汽的输送进而引起两个区域湿冷型复合极端天气的差异。

3 湿冷型复合极端事件的时间演变

尽管观测数据和气候模式模拟结果一致表明, 在全球以及北半球尺度上, 冬季极端低温事件发生

频次整体呈下降趋势 (王晓娟, 2012; 高丽等, 2019; Zhuo et al., 2024), 但强极端冷事件发生频次反而呈现增多特征 (Gong et al., 2014; Wang et al., 2017; Gao et al., 2019, 2021)。鉴于低温冰冻雨雪灾害对农业、交通以及能源等行业的影响不仅与其强度有关, 其持续时间和影响范围也是重要因素, 为此进一步对比了长江以南以及东北地区区域性湿冷型复合极端事件的强度、持续时间以及影响范围 (图 7)。长江以南区域性湿冷型复合极端事件的平均持续时间为 5.2 d, 约有 30 万 km^2 地区受湿冷型复合极端天气影响 (图 7a 和 7b)。1962—2022年冬季, 几乎每年冬季长江以南地区都会出现区域性湿冷型复合极端事件, 其持续时间、影响范围和强度均存在显著的年际差异, 但并未呈现出明显的趋势特征 (图 7a—7c)。鉴于长江以南湿冷型复合极端事件的形成依赖于热带的暖湿气流输送和中高纬环流异常引起的冷空气南下的共同作用, 其持续时间、影响范围和强度的年际变化原因有待进一步基于动力诊断探究热带海温异常以及极涡异常等的影响过程。

1962—2022 年冬季, 东北地区仅有 13 a 出现区域性湿冷型复合极端事件, 其平均持续时间为 3.3 d, 低于长江以南地区事件; 影响范围约为 38.3 万 km^2, 与长江以南地区事件的影响范围相当 (图 7d—7f)。值得注意的是, 东北地区区域性湿冷型复合极端事件近 30 a (1992—2021 年) 的发生频次 (7 次) 虽与前 30 a (1962—1991 年) 发生频次 (6 次) 相当, 但近 30 a 区域性湿冷型复合极端事件的强度和影响范围分别增加了 100% 和 43.5% (图 7d, f)。

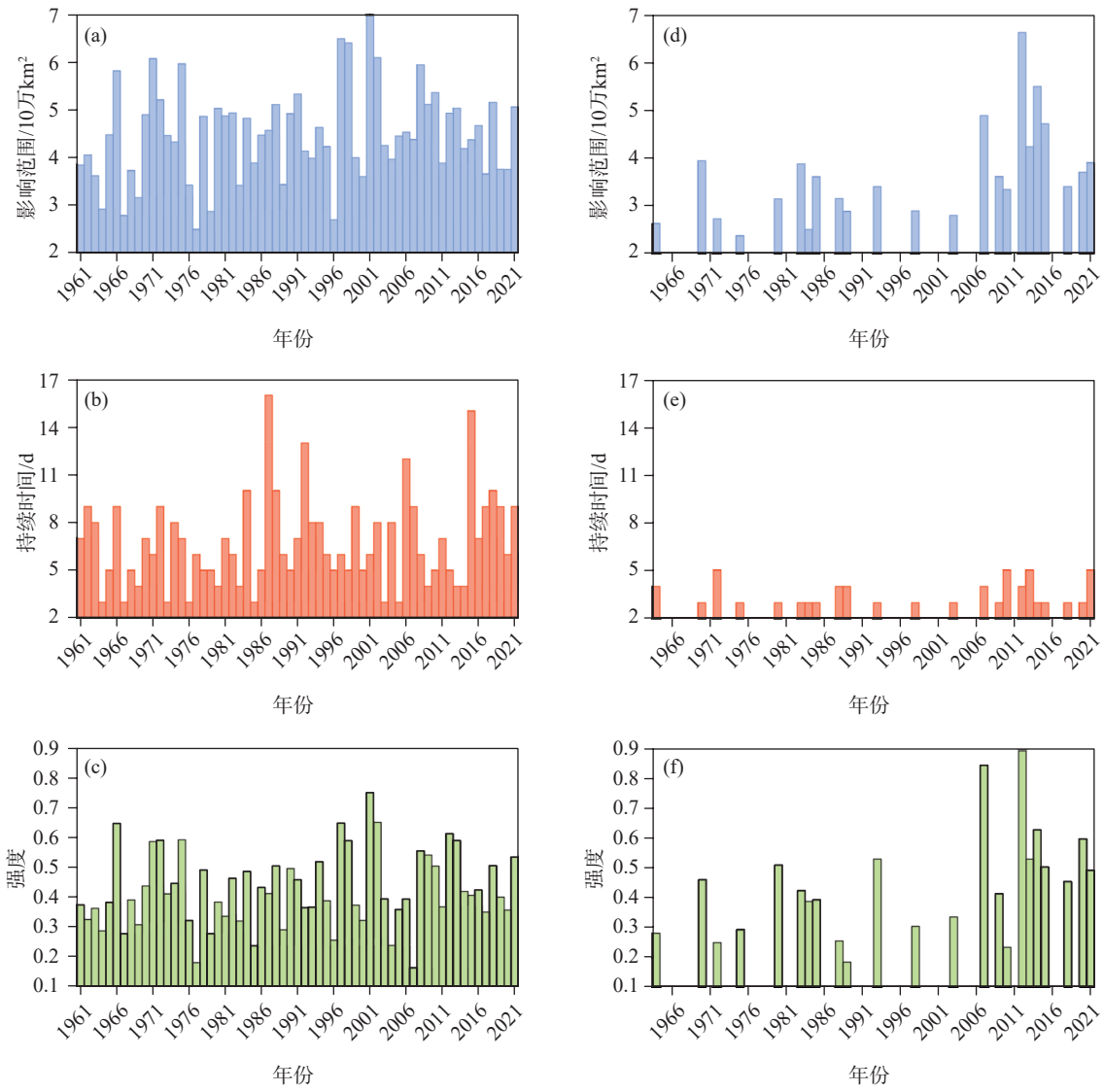


图 7 1962—2022 年冬季长江以南地区 (a—c) 和东北地区 (d—f) 湿冷型复合极端事件的影响范围 (a, d)、持续时间 (b, e) 和强度 (c, f) 年际变化

Fig. 7 Interannual variations of (a, d) spatial extent, (b, e) duration, and (c, f) intensity for wet-cold compound extreme events over (a-c) south of the Yangtze River and (d-f) northeastern China during the winter from 1962 to 2022

图 8 给出的 1962—2022 年冬季长江以南和东北区域性湿冷型复合极端事件累积强度更清楚地显示，东北地区近 30 a 区域性湿冷型复合极端事件的平均强度更强、影响范围更广，其危险性进一步增加。为进一步考察此变化是来源于气温还是湿度，进一步将累积强度分解为湿度分量和温度分量。其中，累积强度的湿度 (温度) 分量定义为区域性湿冷型复合极端事件中每日出现湿冷型复合极端天气的格点标准化湿度 (温度) 绝对值之和。

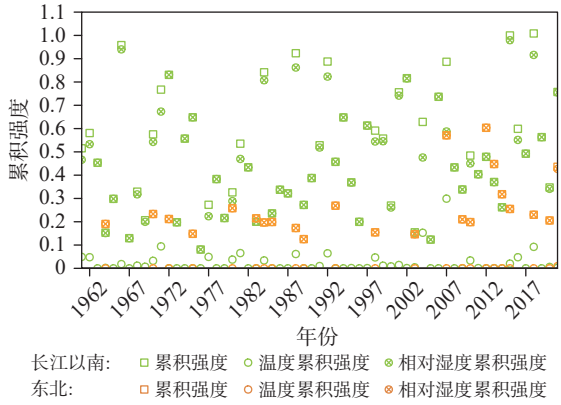


图 8 1962—2022 年冬季长江以南地区 (绿色) 和东北地区 (橙色) 区域性湿冷型复合极端事件的累积强度 (单位：10 万 $km^2 \cdot d$) 以及温度、相对湿度累积强度逐年变化散点图

Fig. 8 Scatter plots showing interannual variations of cumulative intensity (squares, unit: 10^5 $km^2 \cdot d$) and its temperature and relative humidity components for the wet-cold compound extreme events during winters from 1962 to 2022 over the south of the Yangtze River (green) and northeastern China (orange).

长江以南和东北地区，区域性湿冷型复合极端事件的累积强度均主要来源于湿度分量，尤其是在东北地区，湿度分量基本与总累积强度相当 (图 8)，湿度对总累积强度的解释方差分别为 89.8% 和 74%，远大于温度分量的贡献 (10.2% 和 26%)。

全球不断增暖背景下，东北地区相对湿度变率呈现显著增加趋势 (图 9a)，通过了 0.05 的显著性水平检验，而气温变率呈现不显著下降趋势(图 9b)，增强的相对湿度变率意味着该地区湿冷型复合极端天气的相对湿度异常强度将增大。由于湿冷型复合极端事件的强度高度取决于相对湿度的强度，进而使得湿冷型复合极端事件的整体强度变得更强。为了探究东北地区相对湿度对湿冷型复合极端天气事件范围的影响，逐年统计了 1962—2022 年冬季东北地区持续 3 d 满足湿冷型复合极端事件湿度条件的面积，该面积满足以下 2 个条件：(1) 逐日相对湿度高于其 85 百分位；(2) 逐日相对湿度高于 80%。在过去 60 余年，东北地区满足湿冷型复合极端事件湿度条

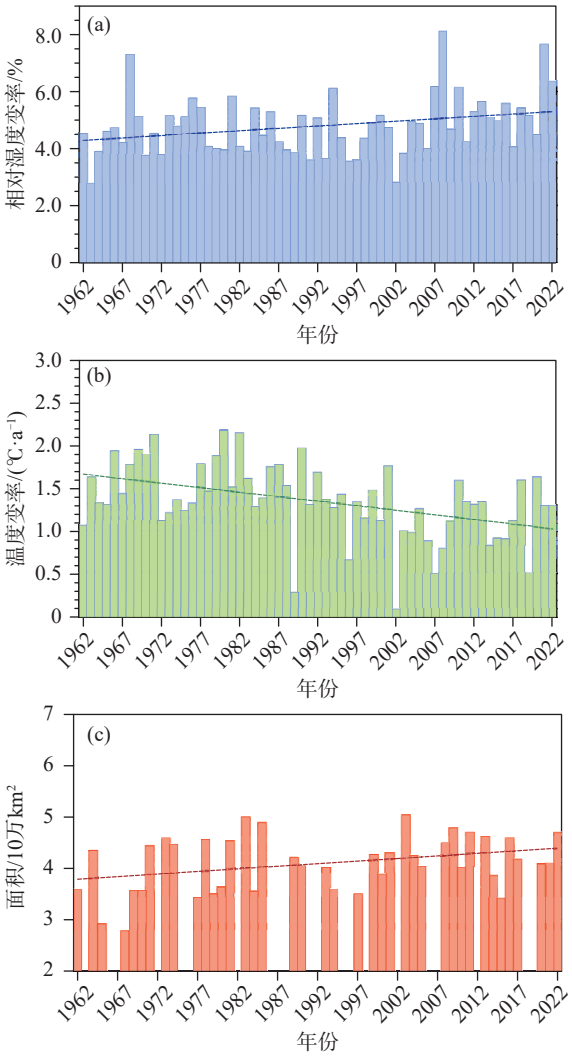


图 9 1962—2022 年冬季东北地区相对湿度变率 (a) 和温度变率 (b) 以及满足湿冷型复合极端天气湿度条件的面积 (c) 的逐年变化和长期线性拟合 (虚线) 序列

Fig. 9 Interannual variations and long-term linear trends of (a) relative humidity variability and (b) temperature variability in northeastern China during winters from 1962 to 2022. (c) The corresponding variations for the area extent meeting humidity criteria for wet-cold compound extreme events in northeastern China

件的范围呈现显著的扩大趋势 (0.1 万 $km^2 \cdot d^{-1}$)，通过了 0.05 的显著性水平检验 (图 9c)。由此可见，水汽变化是造成东北地区区域性湿冷型复合极端事件危险性增大的原因之一。

4 结论与讨论

本文采用 2 m 气温、降水和相对湿度三变量的绝对阈值和相对阈值结合的判识标准，定义有利于低温雨雪冰冻灾害发生的湿冷型复合极端天气，并对比分析了东北与长江以南两个区域的湿冷型复合极端天气的温湿配置，主要得出如下结论：

(1) 长江以南和东北地区均是我国湿冷型复合极

端天气高发区, 长江以南(东北)冬季平均发生频次可达 30 d (10 d)以上。在长江以南 (东北) 典型的低温雨雪冰冻过程中, 平均 61.3% (58%) 的区域出现了湿冷型复合极端天气, 说明本文提出的湿冷型复合极端天气对于这两个区域低温雨雪冰冻灾害均有较好的刻画效果。

(2) 长江以南和东北地区的湿冷型复合极端天气的温度和湿度组合配置存在显著差异。长江以南地区以中等强度降温和高湿度为主要特征, 气温分布主要集中在−4~0 ℃ 之间, 对应着 0.6~1 倍标准差的降温, 相对湿度处于较高水平, 约 75% 分布于 88%~94% 之间。东北地区以强降温和中等湿度为主, 气温主要分布于−26~−6 ℃, 对应 1~1.5 倍标准差的降温, 而相对湿度主要位于 80%~85% 的范围。

(3) 长江以南的区域性湿冷型复合极端事件的平均持续时间为 5.2 d, 影响范围约为 30 万 km^2。1962—2022 年冬季几乎每年冬季长江以南地区都会出现区域性湿冷型复合极端事件, 而东北地区仅有 13 a 出现了区域性湿冷型复合极端事件, 其平均持续时间为 3.3 d, 影响范围约为 38.3 万 km^2。近 30 a (1992—2021 年) 东北地区区域性湿冷型复合极端事件的强度和影响范围相比于前 30 a (1962—1991 年) 分别增加了 100% 和 43.5%。该湿冷型复合极端事件的变化与相对湿度存在密切联系, 近 60 余年, 该地区相对湿度的变率显著增大, 影响范围扩大, 进而造成湿冷型复合极端事件危险性增大。

本文基于 CN05.1 观测资料的统计分析发现东北地区的湿冷型复合极端事件呈现广发和强发的变化特征主要来源于湿度的作用, 同时采用 Li 等 (2020) 均一化订正的台站逐日相对湿度资料进一步验证该结论。该数据集使用了 MASH 方法进行数据的均一化处理, 并通过同一气候区内序列的相互比较来检测和调整原始气候序列中可能的断点, 时间范围为 1960—2017 年。全球不断增暖背景下, 均一化台站观测资料也显示东北地区的相对湿度变率在 95% 的显著性水平上呈现显著增加趋势, 这与 CN05.1 资料的结果一致 (图略)。然而, 东北地区满足湿冷型复合极端事件湿度条件的范围变化趋势并不显著。综上, 东北地区区域性湿冷型复合极端事件强度增大的原因之一为水汽变率增大的作用。至于水汽对其影响范围的变化贡献如何, 还存在一定的不确定性, 有待进一步结合动力诊断技术进行探究。

需要指出的是, 目前的研究结果均是基于再分析资料的统计诊断分析, 未来还需要基于数值模式定量考察东北地区水汽变率的显著增加趋势究竟是来源于环流变化、全球变暖背景变化还是二者共同作用以及各因子的相对贡献。此外, 基于 CMIP6 模式模拟结果, 中国冬季的湿极寒事件发生频率占比呈显著增加趋势, 其中在 SSP5-8.5 高排放情景下, 湿极寒事件发生频率占比的增加幅度最大 (He et al., 2024)。然而, 由于目前气候模式对于造成湿冷型复合极端事件的关键环流系统的模拟还存在较大偏差, 该增加趋势究竟来源于外强迫还是大气内部变率还有待进一步探索新的归因方法。

参考文献 (References):

杜小玲,蓝伟,何东坡,等.2024. 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[J].暴雨灾害,43(4):395−406. Du X L, Lan W, He D P, et al. 2024. 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 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4):395−406 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−100

杜晓丹,赵宇,赵玲.2024. 2021 年 11 月两次黄淮气旋引发的东北地区暴雪过程对比分析[J].冰川冻土,46(6):1800−1815. Du X D, Zhao Y, Zhao L. 2024. Comparative analysis of two snowstorm events in Northeast China caused by Huang-Huai cyclones in November 2021 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,46(6):1800−1815 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0240.2024.0141

多奕霖,黄艳艳,张杰,等.2025.东北冻雨成因和预警模型研究[J].地球物理学报,68(5):1598−1614. Duo Y L, Huang Y Y, Zhang J, et al. 2025. Study on the cause and early-warning model of freezing rain in Northeast China [J]. Chinese Journal of Geophysics,68(5):1598−1614 (in Chinese). doi:10.6038/cjg2024R0855

范可,杨洪卿,田宝强,等.2024.中国东北极端持续大暴雪事件的个例成因及可预测性[J].大气科学学报,47(2):201−215. Fan K, Yang H Q, Tian B Q, et al. 2024. Causes and prediction skill of a case study on persistent heavy snowfall events in Northeast China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,47(2):201−215 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20231231001

高丽,任宏利,郑嘉雯,等.2019.基于 NCEP-GEFS 回算资料的我国极端温度变化特征研究[J].大气科学学报,42:58−67. Gao L, Ren H L, Zheng J W, et al. 2019. Diagnosis features of extreme temperature variations in China based on the NCEP-GEFS reforecast [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,42:58−67 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180911001

高清源,金巍,高清泉,等.2024. 2021 年 11 月 7—9 日辽宁省极端雨雪天气分析[J].气象与环境学报,40(2):1−8. Gao Q Y, Jin W, Gao Q Q, et al. 2024. Diagnostic analysis of the extreme rain-snow process in Liaoning province from November 7-9, 2021 [J]. Journal of Meteorology and Environment,40(2):1−8 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−503X.2024.02.001

韩永秋,周连童,黄荣辉.2021.中国冬半年极端低温事件的时空特征及其与东亚冬季风的关系[J].气候与环境研究,26(1):1−17. Han Y Q, Zhou L T, Huang R H. 2021. Characteristics of the extreme low temperature events in China during winter and its relationship to East Asian monsoon [J]. Climatic and Environmental Research,26(1):1−17

(in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2020.19018

纪立人,布和朝鲁,施宁,等.2008. 2008 年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析 III: 青藏高原-孟加拉湾气压槽[J].气候与环境研究,13(4):446−458. Ji L R, Bueh C L, Shi N, et al. 2008. On the medium-range process of the rainy, snowy and cold weather of South China in early 2008. Part III: Pressure trough over the Tibetan Plateau/Bay of Bengal [J]. Climatic and Environmental Research,13(4):446−458 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2008.04.09

李尚锋,姜大膀,廉毅,等.2018.冬季中国东北极端低温事件环流背景特征分析[J].大气科学,42(5):963−976. Li S F, Jiang D B, Lian Y, et al. 2018. Circulation characteristics of extreme cold events in Northeast China during wintertime [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,42(5):963−976 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1710.17119

吕春艳,李旭,陈军,等.2024.我国南方两次低温雨雪天气成因对比分析[J].沙漠与绿洲气象,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,1:96−104 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.01.011

苗青,巩远发,邓锐捷,等.2016.北半球中高纬度低频振荡对 2012/2013 年冬季中国东北极端低温事件的影响[J].大气科学,40(4):817−830. Miao Q, Gong Y F, Deng R J, et al. 2016. Impacts of the low-frequency oscillation over the extra-tropics of the Northern Hemisphere on the extreme low temperature event in Northeast China in the winter of 2012/2013 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,40(4):817−830 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1508.15189

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

石艳,严小冬,李智玉,等.2023.贵州区域低温阴雨气候特征分析[J].高原山地气象研究,43(3):59−65. Shi Y, Yan X D, Li Z Y, et al. 2023. Analysis on the characteristics of cold and rainy weather in Guizhou [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,43(3):59−65 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2023.03.007

王宁,云天,布和朝鲁,等.2023.中国东北地区两场罕见冻雨过程的对比分析[J].大气科学,47(4):1267−1282. Wang N, Yun T, Bush C L, et al. 2023. Comparative analysis of the two unusual freezing rain events in Northeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,47(4):1267−1282 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2304.22068

王晓娟,龚志强,任福民,等.2012. 1960−2009 年中国冬季区域性极端事件的时空特征[J].气候变化研究进展,8:8−15. Wang X J, Gong Z Q, Ren F M, et al. 2012. Spatial/temporal characteristics of China regional extreme low temperature events in winter during 1960-2009 [J]. Advances in Climate Change Research,8:8−15 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−1719.2012.01.002

王颖,王晓云,江志红,等.2013.中国低温雨雪冰冻灾害危险性评估与区划[J].气象,39(5):585−591. Wang Y, Wang X Y, Jiang Z H, et al. 2013. Assessment and zoning of low-temperature, rain/snow and freezing disasters in China [J]. Meteorological Monthly,39(5):585−591 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2013.05.006

温泉沛,周月华,李兰,等.2024.湖北省持续低温雨雪过程评估与分析[J].暴雨灾害,43(4):440−447. Wen Q P, Zhou Y H, Li L, et al. 2024. Evaluation and analysis of continuous low temperature rain and snow process in Hubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4):440−447 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−108

吴佳,高学杰.2013.一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J].地球物理学报,56(4):1102−1111. Wu J, Gao X J. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics,56(4):1102−1111 (in Chinese). doi:10.6038/cjg20130406

张博,张芳华.2024. 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[J].暴雨灾害,43(4):384−394. Zhang B, Zhang F H. 2024. Characteristics of circulation anomalies of two continuous low temperature rain and snow freezing weather processes in eastern China in February 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4):384−394 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−108

Bernstein B C. 2000. Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain, and ice pellet events [J]. Weather Forecasting,15:485−508. doi:10.1175/1520−0434(2000)015<0485:RALIOF>2.0.CO;2

Dai G, Li C, Han Z, et al. 2022. The nature and predictability of the East Asian extreme cold events of 2020/21 [J]. Advances in Atmospheric Sciences,39(4):566−575. doi:10.1007/s00376−021−1054−6

Gao W, Duan K, Li S. 2019. Spatial-temporal variations in cold surge events in northern China during the period 1960–2016 [J]. Journal of Geographical Sciences,29(6):971−983. doi:10.1007/s11442−019−1638−6

Gao W, Duan K, Li S. 2021. A spatial–temporal analysis of cold surge days in northern China during 1960–2016 [J]. Natural Hazards,108(1):147−162. doi:10.1007/s11069−021−04695−9

Ge S, Jiang C, Wang J, et al. 2023. Analyzing temperature and precipitation extremes in China using multiple gridded datasets: A comparative evaluation [J]. Weather and Climate Extremes,42:100614. doi:10.1016/j.wace.2023.100614

Guo J, Liang X, Wang X, et al. 2023. Potential benefits of limiting global warming for the mitigation of temperature extremes in China [J]. npj Climate and Atmospheric Science,6(1):106. doi:10.1038/s41612−023−00439−7

Gong Z, Feng G, Ren F, et al. 2014. regional extreme low temperature event and its main atmospheric contributing factors [J]. Theoretical and Applied Climatology,117(1-2):195−206. doi:10.1007/s00704−013−1004−z

He Y, Peng Y, Wang Z, et al. 2024. The transition to humid extreme cold events in winter during the past six decades over China [J]. Environmental Research Letters,19:094051. doi:10.1088/1748−9326/ad5c91

Herring S C, Christidis N, Hoell A, et al. 2021. Explaining extreme events of 2019 from a climate perspective [J]. The Bulletin of the American Meteorological Society,102(1):1−116. doi:10.1175/BAMS−D−20−0151.1

Jeong J H, Ho C H, 2005. Changes in occurrence of cold surges over East Asia in association with Arctic Oscillation [J]. Geophysical Research Letters, 32: L14704. doi:10.1029/2005GL023024

Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al. 2015. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics [J]. Journal of the Meteoro-

logical Society of Japan,93(1):5−48. doi:10.2151/jmsj.2015−001

Li J, Liao Z, An N, et al. 2024. Combined influence of 10–30 day tropical and mid–high latitude intraseasonal oscillations on the rapid increases of humid heatwaves in Southern China [J]. Geophysical Research Letters,51:e2024GL112847. doi:10.1029/2024GL112847

Liao Z, Zhai P, Chen Y, et al. 2020. Differing mechanisms for the 2008 and 2016 wintertime cold events in southern China [J]. International Journal of Climatology,40:4944−4955. doi:10.1002/joc.6543

Lin J, Cheung H N. 2022. Distinct mid-latitude Eurasian Rossby wave trains preceding strong and weak cold surges in southern China [J]. Frontiers in Earth Science,10:861015. doi:10.3389/feart.2022.861015

Luo D, Xiao Y, Yao Y, et al. 2016. Impact of Ural blocking on winter warm Arctic–cold Eurasian anomalies. Part I: Blocking-Induced amplification [J]. Journal of Climate,29:3925−3947. doi:10.1175/JCLI−D−15−0611.1

Luo M, Wu S, Liu Z, et al. 2022. Contrasting circulation patterns of dry and humid heatwaves over Southern China [J]. Geophysical Research Letters,49(16):e2022GL099243. doi:10.1029/2022GL099243

Massey F. 1951. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit [J]. Journal of the American Statistical Association,46:68−78. doi:10.1080/01621459.1951.10500769

Qian X, Miao Q L, Zhai P M, et al. 2014. Cold-wet spells in mainland China during 1951-2011 [J]. Nature Hazards,74(2):931−946. doi:10.1007/s11069−014−1217−1

Song L, Wang L, Chen W, et al. 2016. Intraseasonal variation of the strength of the East Asian trough and its climatic impacts in boreal winter [J]. Journal of Climate,29:2557−2577. doi:10.1175/JCLI−D−15−0471.1

Stewart R E, Theriault J M, Henson W. 2015. On the characteristics of and processes producing winter precipitation types near 0°C [J]. The Bulletin of the American Meteorological Society,96(4):623−639. doi:10.1175/BAMS−D−14−00032.1

Sun J, Zhao S. 2010. The impacts of multi-scale weather systems on freezing rain and snowstorms over southern China [J]. Weather Forecasting,25(2):388−407. doi:10.1175/2009WAF2222254.1

Wang Z, Sun Z, Zeng G. 2017. Characteristics of strong cold air outbreaks in China's central and eastern Mongolian Region between 1970 and 2013 [J]. Atmosphere,8(6):98. doi:10.3390/atmos8060098

Yeh S W, Cai W, Min S K, et al. 2018. ENSO atmospheric teleconnections and their response to greenhouse gas forcing [J]. Review of Geophysics,56(1):185−206. doi:10.1002/2017RG000568

Yu S, Tett S F B, Freychet N, et al. 2021. Changes in regional wet heatwave in Eurasia during summer (1979–2017) [J]. Environmental Research Letters,16(6):064094. doi:10.1088/1748−9326/ac04b8

Zhang K, Hsu P C. 2025. Coupling of distinct tropical and extratropical intraseasonal modes triggers compound cold-wet extreme events over the Yangtze River Basin [J]. Journal of Climate,38:1749−1767. doi:10.1175/JCLI−D−24−0075.1

Zhang Y, Chen C, Niu Y, et al. 2023. The severity of heat and cold waves amplified by high relative humidity in humid subtropical basins: A case study in the Gan River Basin, China [J]. Nature Hazards,115(1):865−898. doi:10.1007/s11069−022−05674−4

Zhuo W, Yao Y, Luo D, et al. 2024. The response of atmospheric blocking and East Asian cold extremes to future Arctic Sea ice loss [J]. Atmospheric Research,304:107355. doi:10.1016/j.atmosres.2024.107442

(责任编辑　杨　浩)