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

# 2025年4月11—13日我国大范围极端大风天气过程特征和成因

郑永光 何迪 李典南 杨波

## Characteristics and formation mechanisms of the widespread extreme gale weather process in China during April 11-13, 2025

ZHENG Yongguang，HE Di，LI Diannan，YANG Bo

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-085

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

基于ECMWF模式漏报的青岛沿海大风预报模型及其应用

A forecast model for gale along the coast of Qingdao corresponding to the ECMWF missing-forecast and its operational application

暴雨灾害. 2024, 43(2): 185-194 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-203

冷涡背景下河北雷暴大风环境条件与对流风暴演变个例分析

Analysis of environmental condition and convective storm evolution of a thunderstorm gale event under cold vortex in Hebei

暴雨灾害. 2020, 39(1): 52-62 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.01.006

东北冷涡背景下弓形回波导致的雷暴大风成因分析

Analysis of the causes of thunderstorm winds caused by bow echoes under the background of Northeast China cold vortex

暴雨灾害. 2024, 43(6): 693-701 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-231

2024年1月引发雪崩的阿勒泰极端强降雪天气成因和预报分析

Analysis of the causes and forecast of the extremely heavy snowfall in Altay Area that triggered avalanches in January 2024

暴雨灾害. 2024, 43(4): 407-418 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-059

2020年江淮地区梅雨异常的成因分析

Cause analysis of Meiyu anomaly in Jianghuai region in 2020

暴雨灾害. 2020, 39(6): 555-563 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.002

2021年中国降水异常气候特征及4次典型极端天气过程分析

Analysis of unusual climatic characteristics of precipitation and four typical extreme weather processes in China in 2021

暴雨灾害. 2022, 41(5): 489-500 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-045

关注微信公众号，获得更多资讯信息

郑永光,何迪,李典南,等.2025. 2025 年 4 月 11—13 日我国大范围极端大风天气过程特征和成因[J].暴雨灾害,44(4):421−430.
ZHENG Yongguang, HE Di, LI Diannan, et al. 2025. Characteristics and formation mechanisms of the widespread extreme gale weather process in China during April 11-13, 2025 [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):421−430 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−085

# 2025 年 4 月 11—13 日我国大范围极端大风天气过程特征和成因

郑永光[1, 2, 3], 何迪[1, 2], 李典南[2, 3], 杨波[2]

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 国家气象中心, 北京 100081; 3. 南京信息工程大学, 南京 210044)

**摘　要**: 2025 年 4 月 11—13 日, 我国北方和中东部发生一次大范围极端大风天气过程。利用常规观测、风廓线雷达观测、再分析等资料, 分析了此次过程极端大风的观测特征、天气尺度和中小尺度成因以及极端性成因。结果表明: 此次过程具有分布范围广、持续时间长、强度大、极端性强、极大风速不断加强、伴有多种灾害性天气等特征; 64 个国家级气象观测站阵风风速突破历史极值, 其中极大风速最大值达 46.8 m·s$^{-1}$。此次过程的主要天气影响系统是南下的大范围地面反气旋、高空冷涡和斜压扰动形成的地面气旋, 属于一次典型的大范围强冷空气爆发和斜压扰动发展共同作用下出现的过程, 其关键形成机制是对流层中层的涡度平流和中低层的强温度平流。极端强的大范围冷暖空气异常及其相互对峙形成极端强的斜压性大气, 从而产生大范围强的位势高度梯度和高低空急流, 使得此次过程表现出极端性。黄土高原等大范围高海拔地形产生的热力作用阻滞冷空气前沿大风区的推进, 但背风波等产生中尺度下沉运动通过动量下传产生局地强阵风。显著的垂直风切变形成活跃的湍流活动, 导致强垂直混合作用, 以及中尺度波动会产生较强的下沉运动, 这些因素共同作用使得高空大风动量下传到地面, 是局地极端强阵风形成的重要原因。

**关键词**: 大风; 极端; 斜压; 冷涡; 湍流

**中图法分类号**: P458.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−085

# Characteristics and formation mechanisms of the widespread extreme gale weather process in China during April 11-13, 2025

ZHENG Yongguang[1, 2, 3], HE Di[1, 2], LI Diannan[2, 3], YANG Bo[2]

(1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081; 2. *National Meteorological Centre*, *Beijing* 100081; 3. *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210009)

**Abstract:** A widespread extreme gale weather process occurred across northern and central-eastern China from April 11 to 13, 2025. Based on conventional observations, wind profiler data, and reanalysis data, this study presents the observational characteristics, synoptic-scale and mesoscale mechanisms, and contributing factors to the extremity of wind gales. The results are as follows. This process was characterized by extensive coverage, prolonged duration, exceptional intensity, record-breaking extremity, progressively intensifying wind gusts, and concurrent multiple types of hazardous weather phenomena. Sixty-four national-level meteorological stations recorded historic maximum gust speeds, with the maximum reaching 46.8 m·s$^{-1}$. The primary synoptic systems responsible for this process were a large-scale southward-moving surface anticyclone, an upper-level cold vortex, and surface cyclones generated by baroclinic disturbances, constituting a typical case of extensive cold-air outbreak coupled with baroclinic disturbance development. The synoptic-scale formation mechanism involved mid-tropospheric vorticity advection and lower-to-middle tropospheric strong thermal advection. The extremity of this process was attributed to exceptionally intense large-scale anomalies of cold and warm air masses and their frontal confrontation, which generated extreme baroclinicity that subsequently established extensive, steep geopotential height gradients and vertically coupled jets. The thermodynamic effects induced by extensive high-altitude regions, particularly the Loess Plateau, acted to impede the advancement of the gale zone along the cold air front. However, the mesoscale downdraft of lee waves generated localized high wind gusts through downward momentum transport. Strong vertical wind shear triggered vigorous turbulent motions, inducing strong vertical mixing.

**收稿日期**: 2025−05−06; **定稿日期**: 2025−05−27

**资助项目**: 国家自然科学基金项目 (U2342204); 中国气象局强对流天气重点创新团队项目 (CMA2022ZD07)

**第一作者**: 郑永光, 主要从事强对流天气研究和预报。E-mail: zhengyg@cma.gov.cn

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

Simultaneously, mesoscale waves produced intense downward motion. These combined dynamical processes facilitated the downward transport of upper-level momentum to the surface, generating localized extreme wind gusts.

**Key words:** gale; extreme; baroclinicity; cold vortex; turbulence

## 引　言

我国地面气象观测规范中对大风定义为瞬时风速达到或超过 17.0 m·s$^{-1}$ (或目测估计风力达到或超过 8 级) 的风 (涂满红等, 2017)。大风是灾害性天气之一, 易导致人员伤亡、财产损失, 还会严重破坏电力线路等基础设施, 并对农业和交通运输等行业造成重大灾害。如 1999 年 11 月 24 日, 山东烟大轮船轮渡有限公司的大舜号滚装船在渤海遭遇冷空气大风翻沉, 造成 285 人遇难、5 人失踪。根据大风的形成原因, 大风可分为冷空气大风、温带气旋大风 (也称为气旋大风)、热带气旋 (台风) 大风、强对流大风 (包括雷暴大风和龙卷风) 等。冷空气大风和气旋大风通常分布范围广, 而强对流大风分布范围通常显著小于其他几类大风, 具有空间分布不连续、多尺度和强风灾害时空尺度小等特征 (郑永光等, 2016a, 2016b)。研究表明, 我国有三个大风高发地区: 一是中蒙边境地区, 年平均大风日数多达 50~75 d, 主要受寒潮大风和气旋大风影响所致, 也是雷暴大风的高发区 (田付友等, 2022); 二是青藏高原, 年平均大风日数更高达 100 d 左右, 其形成原因与海拔高、高空急流和动量下传等原因密切相关 (张家诚和林之光, 1985); 三是东南沿海, 主要受台风影响所致 (国家气候中心, 2018), 该大风区的大风日数显著少于前两个大风区域。

我国北方等地春季大风多发, 4 月份地面平均风速普遍增大, 这与冷空气、气旋和冷涡活动等密切相关, 极大风速主要是冷空气 (寒潮) 大风或局地性强对流天气所造成 (张家诚和林之光, 1985; 国家气候中心, 2018)。我国气旋和反气旋的频率均是在春季最多。国家气候中心 (2018) 给出了我国主要的气象灾害气候分布, 虽然并未直接给出大风天气的气候分布, 但寒潮路径表明, 我国的中蒙边境和中东部地区易受冷空气影响发生大风天气。冷涡与冷空气活动密切相关, 后部常会导致地面大风。冷涡完全不同于对流层低层的温带气旋, 但与温带气旋关系密切, 多数是由与温带气旋相关联的高空西风槽不断加深、槽的南部为暖空气切断所致, 是大气强烈斜压发展的结果。虽然夏季是冷涡影响我国范围最广、次数最多的季节, 但在 4 月份冷涡明显增多 (郑永光和宋敏敏, 2021)。温带气旋是典型的斜压扰动, 常带来地面大风; 不过, 大风与近地面大气温度梯度是弱依赖关系 (Pryor et al., 2014)。Colle 等 (2015) 总结了美国东海岸和西大西洋温带气旋 (ECs) 的历史和未来趋势, 以及沿海洪水、强降水和破坏性风的可能变化; Booth 等 (2015) 则给出了美国东北部温带气旋产生的 1、3 a 和 5 a 一遇的极端大风气候分布; 最近, 傅云飞等 (2025) 回顾了北半球冬季风暴路径 (即中纬度气旋的高发区) 研究进展, 虽然张家诚和林之光 (1985) 给出了我国气旋的气候统计路径特征, 但近年来关于我国气旋及其产生的大风分布和形成机制的研究还较少。

对于重力波等中尺度波动和对流风暴等, 垂直速度大, 动量下传作用是大气运动方程垂直平流项作用的体现。重力波等中尺度波动会增强过山下沉气流, 从而产生明显动量下传作用, 如新疆克拉玛依一次强风的形成机制 (卢冰等, 2014)。受地形影响明显的区域, 如太行山东麓大风和三峡坝区一次冬季持续性晴空大风的成因是一种特殊的重力波-大振幅背风波 (Lilly and Zipser, 1972; Lilly, 1978) 所致动量下传作用 (王宗敏等, 2012; 范元月等, 2022)。强风越过山脉时产生的转子形成强下沉气流从而会在地面产生强风。强对流风暴或热带气旋中的小尺度涡旋也可能产生极端强风 (Aberson, 2006; Atkins et al., 2004)。下垫面作用, 如峡谷或城市高楼的狭管效应、高海拔的高山或水面 (地表粗糙度小) 的摩擦作用减弱等, 会明显增强局地大风 (盛裴轩等, 2013)。

目前, 我国大范围冷空气和气旋作用产生的极端大风分布和成因的研究尚存在不足, 包括气候分布、气候变化特征、极端性和中小尺度成因等多方面, 对于垂直风切变导致的中尺度波动和湍流垂直混合作用研究较少。2025 年 4 月 11—13 日, 我国中东部地区出现一次大范围极端大风天气过程, 给国民经济和人民生命财产安全造成极大影响。考虑到此次大风过程的发展演变与冷空气爆发、高空冷涡和温带气旋密切相关, 本文重点分析该过程的观测特征、天气尺度和中小尺度成因以及极端性成因, 以期加深对此类天气机理的认识, 为提升大风业务预报能力提供参考。

## 1　资料和方法

本文研究所用资料包括: (1) 国家气象信息中心提供的 2025 年 4 月 11—13 日常规地面和高空观测资料以及全国 10 724 个国家级气象观测站逐时极大

风资料; (2) 中国气象局气象探测中心提供的相应时段北京海淀气象站 (以下简称海淀站) 风廓线雷达逐 6 min 观测资料; (3) 美国气象环境预报中心 (NCEP) 提供的 6 h 一次、1°×1° NCEP 再分析资料。为考察此次大风过程的极端性成因, 使用 NCEP 资料同化系统 GDAS 逐 6 h 分析资料及其 1991—2020 年 30 a 逐日气候平均资料, 以此来计算此次过程的地面、850 hPa 和 500 hPa 气温的气候距平以及海平面气压、850 hPa 和 500 hPa 位势高度的气候距平。

分析此次过程的物理成因时, 使用大气水平运动方程和湍流摩擦力方程 (盛裴轩等, 2013), 计算公式如下

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+fv+F_x^* \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}-fu+F_y^* \tag{2}$$

式中符号为常用物理量符号, $F_x^*$和$F_y^*$ 分别表示 $x$、$y$ 方向湍流摩擦力。假设湍流场水平均一, 对 $x$ 和 $y$ 方向的导数为零, 则有

$$F_x^*=-\frac{\partial\overline{(u'w')}}{\partial z}=K_{\mathrm{m}}\frac{\partial^2\bar{u}}{\partial z^2} \tag{3}$$

$$F_y^*=-\frac{\partial\overline{(v'w')}}{\partial z}=K_{\mathrm{m}}\frac{\partial^2\bar{v}}{\partial z^2} \tag{4}$$

其中, $\bar{u}$和$\bar{v}$为平均量, $u'$、$v'$和$w'$为湍流脉动量; $K_{\mathrm{m}}$ 为湍流动力粘性系数, 通常假设为常数。

## 2 大风过程的观测特征

### 2.1 大风的分布特征和极端性

根据中央气象台统计结果 (https://mp.weixin.qq.com/s/IuecYtl48e6xv7n9f4ucIw), 2025 年 4 月 11—13 日 (图 1a), 西北地区东部、内蒙古、东北地区中部、华北、黄淮、江淮、江南北部和西部以及四川东北部、贵州中部、湖北、广西中部等地最大阵风风力普遍达 8 级以上, 部分地区达 11~13 级, 宁夏银川、甘肃武威、山西长治和忻州、北京门头沟、天津蓟州、浙江杭州、河南安阳和三门峡等地局地达 14 级, 河南安阳林州马安脑站达 15 级 (46.8 m·s$^{-1}$), 是该站建站 60 多年来记录到的最大风速。多地阵风风力破历史极值, 河北、河南、山西、陕西、湖北、内蒙古等地共有 327 个国家级气象观测站最大阵风突破 4 月历史极值, 其中 64 个国家级气象观测站破历史极值。

我国中东部地区出现 2025 年以来最大范围沙尘天气, 内蒙古东部和东北地区南部出现强雨雪或暴雪, 南方出现大范围强对流天气 (图略); 4 月 11 日南方地区迎来 2025 年首轮暴雨天气过程, 江西、安徽、湖北、湖南、贵州等地局地出现大暴雨。

从北京市看, 4 月 11 日 17 时—13 日 06 时 (北京时, 下同) (图 1b), 全市 573 个测站中有 509 个测站 (占比 89%) 最大阵风达 8 级及以上, 350 个测站 (占比 60%) 最大阵风达 9 级及以上, 16 个测站最大阵风达 12~14 级; 10 级以上最大阵风发生在海淀、朝阳、

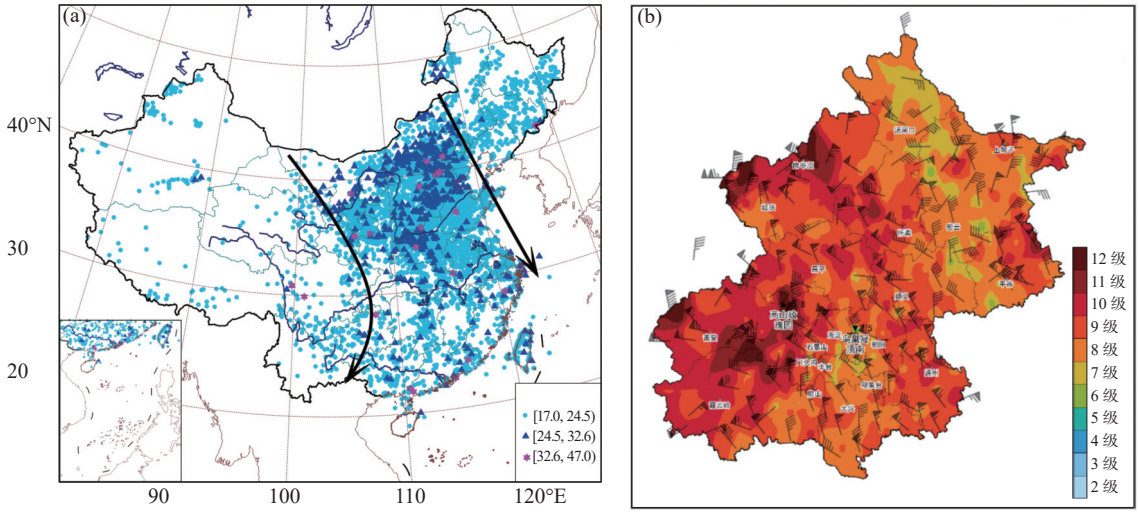



图 1 2025 年 4 月 11 日 08 时—13 日 08 时基于 10 724 个国家级气象观测站的全国 8 级以上不同风速大风分布 (a, 单位: m·s$^{-1}$, 粗箭头表示冷空气前沿大风在中国大陆的推进方向和大致东西边界, 不包含东北地区的气旋前部大风) 以及 4 月 11 日 17 时—13 日 06 时北京市极大风等级分布 (b,来源于 https://weibo.com/2611704935)

Fig. 1 (a) Distribution of gales with wind gust speed above level 8 across China based on 10 724 national-level surface observation stations from 08:00 BT on April 11 to 08:00 BT on April 13, 2025 (The thick arrows indicate the advancing direction and approximate east and west boundaries of the cold-air-front-induced gale zone over China's mainland, excluding the gales associated with the cyclone in Northeast China). (b) Distribution of maximum wind gust over Beijing from 17:00 BT on April 11 to 06:00 BT on April 13, 2025 (derive from https://weibo.com/2611704935)

丰台、石景山、通州、房山、昌平、怀柔、平谷、门头沟、延庆、密云、顺义等区。此次过程，北京市倒伏树木超过 1 500 株 (https://www.beijing.gov.cn/ywdt/gzdt/202504/t20250414_4063555.html)。北京市最大阵风风速为 45.8 m·s$^{-1}$ (14 级)，发生在属于高山站的门头沟高山玫瑰园，浅山区的房山产业园站观测到最大阵风风速为 39.0 m·s$^{-1}$ (13 级)，平原地区通州西太平庄站观测到最大阵风风速为30.5 m·s$^{-1}$ (11 级)。

综上，此次极端大风天气过程具有分布范围广、持续时间长、强度大、极端性强、高海拔站点大风极端性突出、伴随灾害性天气类型多等特点。

## 2.2 大范围大风演变特征

全国逐时极大风分布演变 (图 1、2，部分图略) 显示，大风主要影响时间为 11 日 11 时—12 日 20 时，影响范围和极大风最强时段在 12 日 14—16 时 (图 2b)。2025 年 4 月 11 日 08 时 (图略)，地面极大风超过 6 级风的范围还较小，主要位于内蒙古西部地区，达到 8 级风的范围分布非常零散；11 日 11—12 时 (图 2a)，地面大风范围显著扩大，已经影响到内蒙古大部、宁夏、陕西和山西北部、河北北部、东北中南部等地，风速显著增大，极大风达到 8 级的范围大幅增加，最大阵风超过 10 级；11 日 18—19 时，大

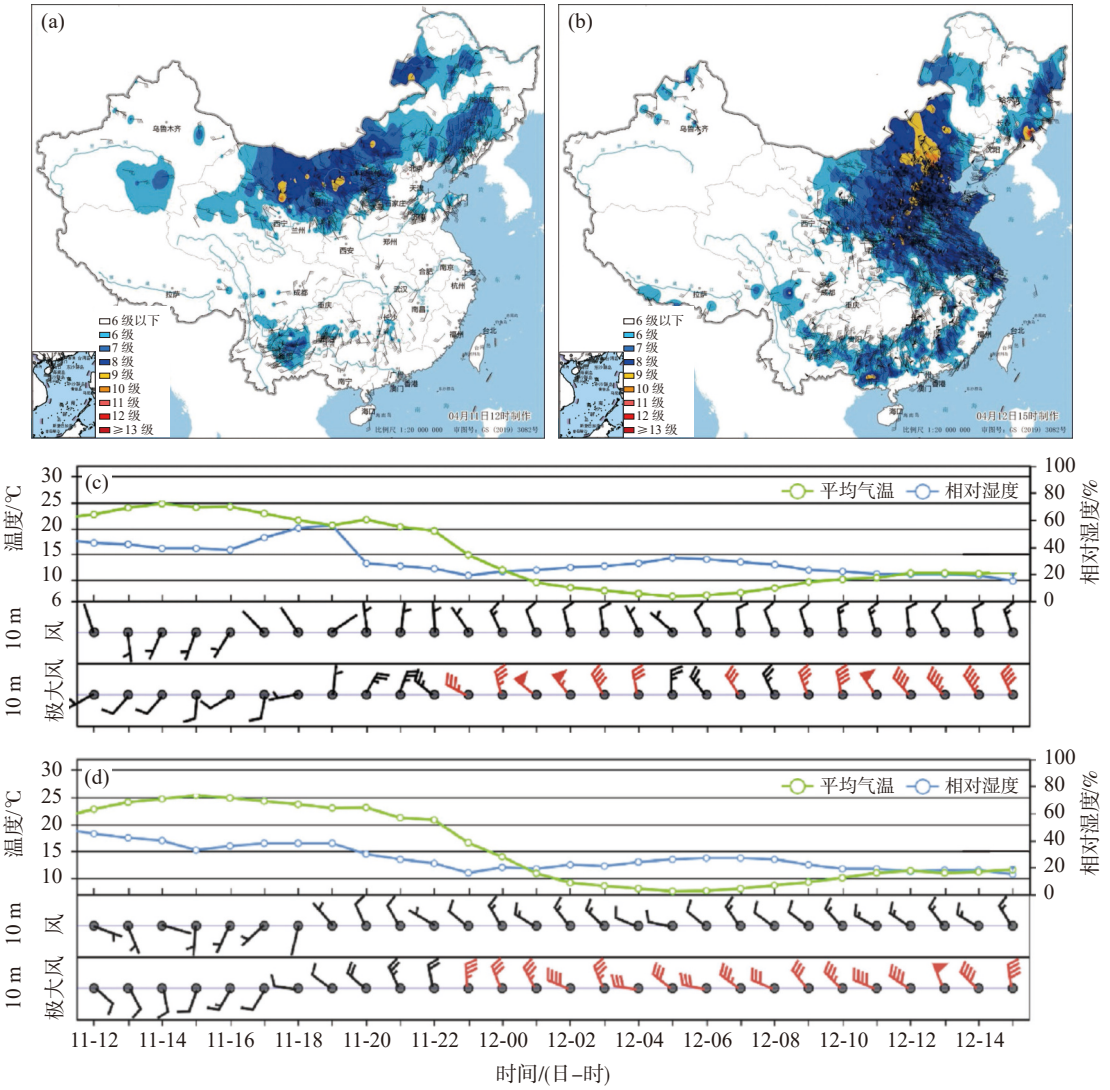



图 2 2025 年 4 月 11 日 12 时 (a) 和 12 日 15 时 (b) 全国逐小时极大风分布以及 11 日 12 时—12 日 16 时北京海淀站 (c) 和北京站 (d) 地面 (10 m) 2 min 平均风、极大风 (为该整点前 1 h 内最大的瞬时风速，红色风羽表示风力不低于 6 级)、气温和相对湿度逐时演变 (图 2a、b 来源于中央气象台网站 http://www.nmc.cn; 图 2c、d 来源于中央气象台业务内网)

Fig. 2 Hourly maximum wind gust speed distribution across China at (a) 12:00 BT on April 11 and (b) 15:00 BT on April 12. Temporal evolution of surface (10 m) 2-min mean wind speed, maximum wind gust speed (defined as the highest instantaneous wind speed within the preceding hour. The red wind feather indicates that the wind force is not less than level 6), air temperature, and relative humidity at (c) Haidian station and (d) Beijing station from 12:00 BT on April 11 to 16:00 BT on April 12, 2025 (Fig. 2a and Fig. 2b are from National Meteorological Centre website http://www.nmc.cn. Fig. 2c and Fig. 2d are from National Meteorological Centre operational intranet)

风前沿到达北京北部、河北西部、河南北部和陕西中部等地; 11 日 20 时—12 日 01 时, 大风影响范围总体变化不大, 但已完全影响北京和河北大部; 12 日 05 时, 大风影响范围显著扩大, 大风前沿到达山东中南部、安徽北部和湖北中部等地; 此后, 大风影响范围快速向东南推进, 12 日 08 时左右, 大风前沿到达江南南部和华南北部等地; 12 日 14—16 时 (图 2b), 大风前沿分别到达华南中部和南部等地, 地面大风达到 8 级风和 9 级风的范围也分别达最大; 12 日 20 时左右, 大风范围显著减小和减弱。

以上分析表明, 此次大范围极端大风过程还具有影响范围不断向东南方向推进和扩大 (图 1b 中黑色粗箭头所示)、极大风速不断加强的特点。

### 2.3 站点大风演变特征

以位于太行山山脚下的海淀站和北京站为代表站, 展示该过程受到地形影响的大风局地演变特征(图 2c、d)。分析可知, 海淀站 (图 2c) 11 日 17—19 时的地面平均风已转为北风, 但这个阶段极大风依然不大、以偏南风为主, 气温略有下降, 相对湿度略有升高, 大风前沿尚未到达; 20 时, 海淀站极大风明显加大, 超过 10 m·s$^{-1}$, 地面气温略有升高, 相对湿度明显下降, 表明冷空气前沿已到达, 由于边界层湍流垂直混合作用加强使得气温升高、相对湿度下降 (罗然等, 2020), 但此时大风主体依然尚未到达; 23 时及以后, 风向基本为西北风, 气温显著降低, 阵风进一步加大, 普遍超过 6 级, 说明冷空气主体已经影响海淀站, 12 日 02 时极大风速达 22 m·s$^{-1}$ (9 级), 为此次过程中海淀站测得的最大阵风风速。北京站位于海淀站的东南方向, 二者直线距离约 26 km。北京站 (图 2d) 地面平均风转为北风的时间约为 11 日 19 时, 较海淀站晚约 2 h, 但北京站极大风与平均风几乎同时均转为北风; 11 日 20—22 时, 北京站地面气温变化不大, 相对湿度略有下降, 平均风和极大风也变化不大, 这表明该站存在类似海淀站的边界层湍流垂直混合作用加强过程; 到 23 时, 极大风增强到 6 级, 气温显著下降, 冷空气主体已经影响该站; 12 日 13 时极大风速达 20.6 m·s$^{-1}$(9 级), 为此次过程中北京站测得的最大阵风风速。北京站 11 日 20 时的探空观测 (图略) 显示, 925 hPa 以下的边界层垂直温度廓线非常接近平行于干绝热线, 露点廓线也接近平行于等比湿线, 也同样表明这时边界层湍流垂直混合运动显著。

上述北京两个地面测站和北京站探空观测的气象要素演变表明, 边界层空气具有活跃的湍流垂直混合作用。

## 3 大风形成机制

### 3.1 天气尺度成因

根据公式 (1) 和 (2), 如此大范围的极端性大风是天气尺度系统相互作用的结果, 在自由大气中主要是气压梯度力和科氏力起作用。

4 月 11 日 08 时海平面气压场 (图 3a) 显示, 冷高压中心位于贝加尔湖以南附近区域, 该高压分布范围广、尺度大, 尺度超过 3 000 km; 气旋中心位于内蒙古中部偏东区域, 尺度小于冷高压, 长轴超过 1 000 km、短轴不到 1 000 km; 反气旋与气旋二者之间的强气压梯度区产生了大范围极大风速达 8 级及以上的强风。随着时间演变 (图 3b、c、d), 冷高压向东南偏南方向移动, 尺度进一步加大; 位于内蒙古中部偏东的气旋向东北方向移动, 尺度变化不大, 冷高压东侧同该气旋之间、以及冷高压的东南侧和南侧同暖空气之间均一直维持着强气压梯度, 产生了大范围的大风区域; 至 12 日 08 时, 冷高压的东侧和东南侧均有气旋存在。强海平面气压梯度是产生地面大风的重要原因之一, 其与下文分析给出的对流层中低层不同等压面的强位势高度梯度均体现了大气的强斜压性。

根据准地转理论 (Holton, 1972; 陶祖钰和谢安, 1989; 陶祖钰等, 2012), 以 500 hPa 为代表的对流层中层的涡度平流和中低层的温度平流可以解释冷高压和气旋的发展过程。图 4 展示了 500 hPa 槽后负涡度平流和中低层冷平流使得地面冷高压向东南偏南方向移动和发展。500 hPa 槽前为疏散槽, 其正涡度平流和中低层暖平流使得地面气旋发展和向东北方向移动; 在 12 日 08 时, 500 hPa 冷空气向东南偏东移动, 形成冷中心和切断低压, 强温度梯度 (强斜压性) 形成了强的位势高度梯度和高空急流, 最大风速超过 40 m·s$^{-1}$, 属于异常强的急流。虽然 850 hPa 位势高度梯度的方向与 500 hPa 相反, 但 850 hPa 的强斜压性同样导致了强急流, 最大风速也超过 20 m·s$^{-1}$ (图略), 故不同层次的大气形成了强垂直风切变, 从而有利于形成强湍流, 加强了近地面大气、边界层大气与自由大气之间的垂直混合。因此, 虽然地面由于湍流摩擦耗散作用使得平均风不是很大 (图 2c、d), 但湍流垂直混合通过动量输送加大了地面极大风速。

综上, 2025 年 4 月 11—13 日此次大范围极端大风天气过程是一次典型的强冷空气爆发和斜压扰动发展过程, 即为南下的大范围地面冷空气 (反气旋) 和气旋 (斜压扰动) (图 3)、对流层中层 500 hPa 横槽转竖发展为尺度超过 2 000 km 的大范围强冷涡 (图 4) 共同作用所致。

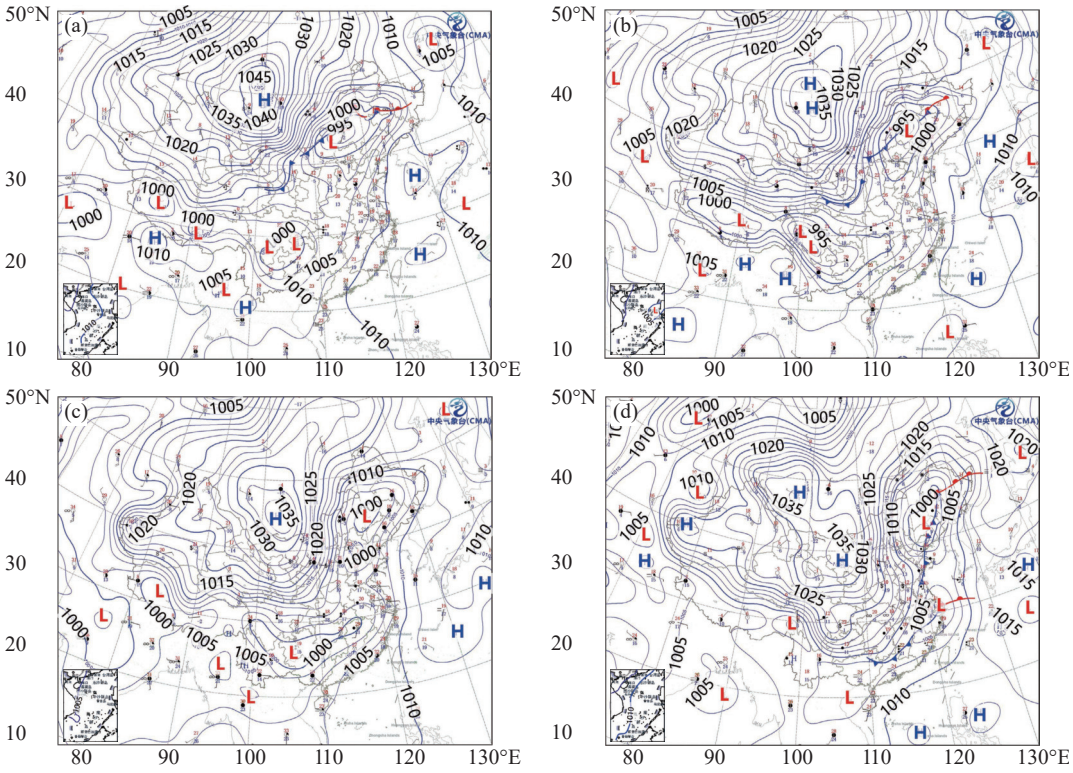



图 3 2025 年 4 月 11 日 08 时 (a)、14 时 (b)、20 时 (c) 和 12 日 08 时 (d) 海平面气压场 (等值线,单位: hPa) 和部分地面站点填图 (表示锋面, 来源于中央气象台网站 http://www.nmc.cn)

Fig. 3 Sea-level pressure fields (contour line, unit: hPa) and plots of selected surface stations at (a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT, (c) 20:00 BT on April 11, and (d) 08:00 BT on April 12, 2025 ( represents the front, derive from National Meteorological Centre website http://www.nmc.cn)

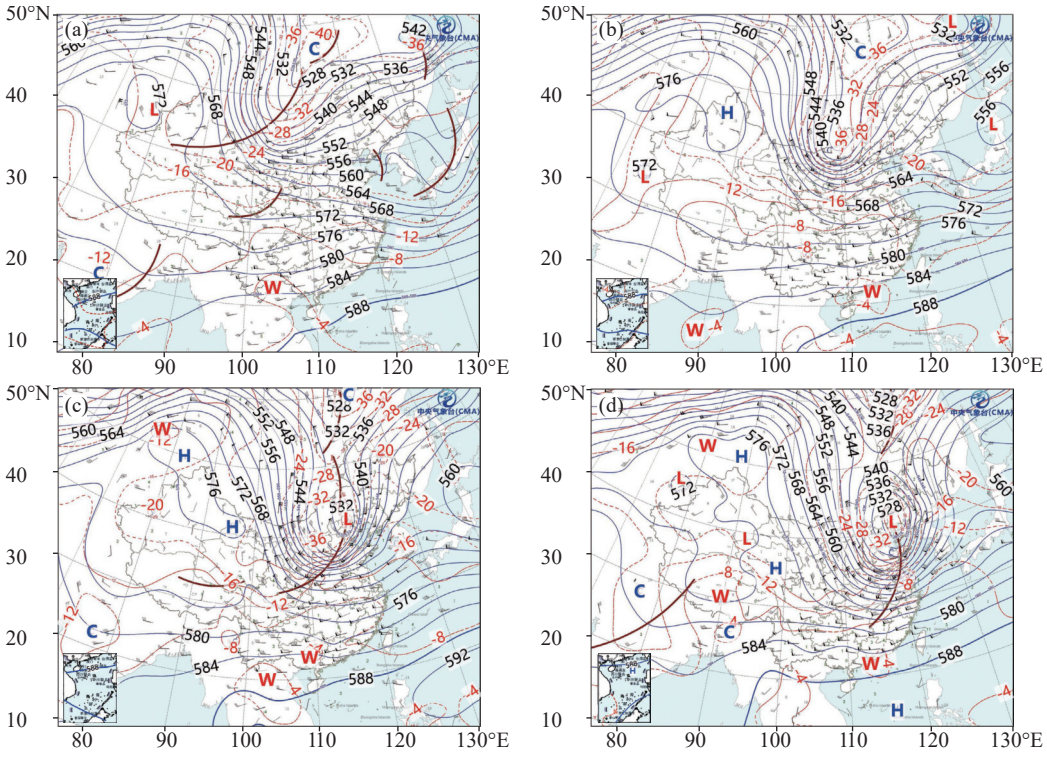



图 4 2025 年 4 月 11 日 08 时 (a)、20 时 (b) 和 12 日 08 时 (c)、20 时 (d) 500 hPa 天气图 (蓝色实线为等高线, 单位: dagpm; 红色虚线为等温线, 单位: ℃; 棕色线表示槽线; 来源于中央气象台网站 http://www.nmc.cn)

Fig. 4 500 hPa weather maps for (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT on April 11, and (c) 08:00 BT and (d) 20:00 BT on April 12, 2025 (Blue solid contours representgeopotential height, unit: dagpm, red dashed contours denote isotherms, unit: °C, brown line represents the groove line, derive from National Meteorological Centre website http://www.nmc.cn)

### 3.2 地形影响

上文中, 位于太行山山脚下的海淀站和北京站地面风演变 (图 2c、d) 显示, 冷空气前沿影响到这些站点时, 受地势高度影响, 冷空气从高海拔高度区域下沉到低海拔高度区域会绝热增温, 逐渐驱离暖空气和通过边界层湍流垂直混合作用升高地面气温和增强风速; 在此次极端大风过程中, 这两个站点从地面转为不太强的偏北风到极大风速增强至 6 级风并同时伴有气温显著下降的时间约 4~5 h, 又过了 2~3 h, 极大风速才增强至 8 级。

从逐时大风分布图 (图略) 来看, 对比冷空气前沿大风从太行山推进到华北平原的时间和从华北平原推进到黄淮区域的时间发现, 前者明显慢于后者, 与上述海淀站和北京站的极大风速演变时间一致。因此, 这些分析表明太行山等地形对于冷空气前沿大风区的向前推进具有较为明显的阻滞影响, 其影响并非是地形的直接动力阻挡作用, 而是由于黄土高原和太行山等午后地面温度受太阳辐射影响和近地面气温均较高 (图略) 对冷空气的减弱作用, 以及冷空气下山增温作用所致。

11 日 20 时 850 hPa 的天气形势图 (图略) 显示, 黄土高原和太行山等地区虽然 850 hPa 的气温梯度和位势高度梯度均已加大, 但位势高度梯度明显弱于 12 日 08 时; 而 11 日 20 时 500 hPa 黄土高原和太行山等地区尚位于槽底前部的位置, 位势高度梯度也明显弱于 12 日 08 时, 表明冷空气主体尚偏西偏北, 这些因素共同作用使得冷空气前沿从黄土高原和太行山等向平原地区推进明显偏慢。

以上分析表明, 冷空气大风前沿从黄土高原推进到低海拔平原较在平原地区的推进需要更多的时间, 而高海拔区域的不均匀地形作用会产生背风波 (Lilly and Zipser, 1972; Lilly, 1978; 卢冰等, 2014), 形成中尺度下沉运动, 使得动量下传在背风坡产生局地强阵风。需要说明的是, 冷空气下山时不会直接产生强的下冲力导致大风, 其产生大风需要中尺度下沉运动的动量下传和湍流作用 (Elvidge and Renfrew, 2016; 罗然等, 2020), 具体分析见下文。

### 3.3 中小尺度成因

天气图分析只能给出天气尺度的演变过程和成因。而地面大风是边界层里中尺度波动和活跃的湍流运动等与天气尺度因素共同作用所致, 风廓线雷达虽不能完全观测到大气中不同尺度的湍流运动, 但能够提供大气垂直风廓线、垂直运动等的中小尺度演变特征。

海淀站风廓线雷达观测 (图 5) 显示, 该站上空风的变化不仅显示高空槽过境的过程, 而且具有显著的中尺度波动演变特征, 相应的垂直速度观测也具有类似特征 (图略), 其可能与风场不均匀所致辐合形成的惯性重力波有关, 也可能与水平风切变不稳定所致的小尺度涡旋相关 (郑永光和陈炯, 2022; 郑永光等, 2024)。海淀站周边 (如北京、延庆和崇礼等站) 观测的垂直风廓线 (图略) 演变也具有类似特征。

由于辐合作用, 大气会产生惯性重力波, 尤其在中性层结大气中, 惯性重力波振幅大, 远大于稳定层结中的振幅, 会产生明显的波动作用 (张玉玲, 1999)。此次极端大风过程中, 探空观测 (图略) 显示, 由于湍流垂直混合作用强烈, 大气层结接近中性层结, 因此有利于产生惯性重力波。此外, 强的垂直风切变有利于产生开尔文-亥姆霍兹不稳定, 开尔文-亥姆霍兹不稳定波长非常短, 只有几千米, 生命期只有几分钟, 然后会破

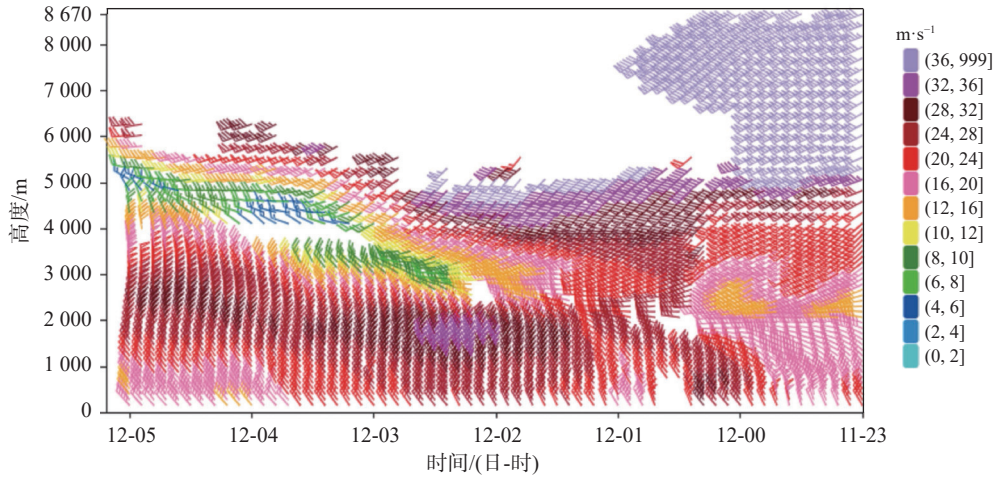



图 5 2025 年 4 月 11 日 23 时—12 日 05 时北京海淀站风廓线雷达观测的风垂直分布演变 (来源于中国气象局气象探测中心天衍网站)

Fig. 5 Evolution of wind vertical distribution from wind profiler observations at Haidian station of Beijing from 23:00 BT on April 11 to 05:00 BT on April 12, 2025 (Data source: Tianyan Platform of Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration)

碎形成湍流 (张玉玲, 1999), 从而会加强垂直混合。

值得注意的是, 12 日 00—04 时, 海淀站近地面至海拔高度约 3 km, 有一个明显的大风加强过程, 该时段最大风速出现在 02—03 时和 2 km 左右高度, 超过 32 m·s$^{-1}$, 但风速分布很不均匀, 具有明显的垂直切变。由公式 (3)、(4) 可知, 这有利于形成强的中尺度下沉气流和活跃的湍流活动, 从而加强垂直混合作用, 使得高空大风的动量下传, 正是在这一时段海淀站观测到地面最大极大风速达 22 m·s$^{-1}$。

因此, 高空大风通过垂直风切变形成活跃的湍流混合过程, 以及惯性重力波等中尺度波动产生的强下沉运动将高层急流的大动量空气输送到地面, 从而导致极端性地面极大风。

## 4 大风极端性成因

如前所述, 此次大风过程的极端性不仅体现在风速强, 还体现在地理分布范围广、持续时间长等方面。11 日 14 时—12 日 14 时逐 6 h 相对逐日气候平均的海平面气压 (图略)、地面气温 (图略)、850 hPa 和 500 hPa 位势高度与气温的距平分布 (图 6) 展示了此次过程极端性的天气学成因。

图 6a、c 显示此次过程大气低层 850 hPa 相互对峙的冷暖空气和相应的位势高度的异常特征, 可见低于–10 ℃ 的冷空气距平的地理分布范围较广, 12 日 08 时异常进一步加强、地理范围显著扩大, 且最强异常低于了–15 ℃; 同时, 暖空气呈现大范围的暖异常, 最强距平超过 10 ℃, 尤其 11 日 20 时暖异常分布范围尤其广阔; 海平面气压和地面气温 (图略) 异常具有类似特征。冷暖空气的温度异常及其对峙导致了位势高度场异常, 从而形成强大的冷高压 (正位势高度异常) 和由于强斜压性形成的温带气旋 (负位势高度异常)。图 6b、d 展示了此次过程 500 hPa 冷气团和位势高度的极端性, 气温距平低于–10 ℃ 的强冷空气地理分布范围同样非常广, 且最强异常也低于了–15 ℃, 如此强的冷异常导致形成了最强位势高度异常低于–25 dagpm 的强冷涡, 从而形成了强

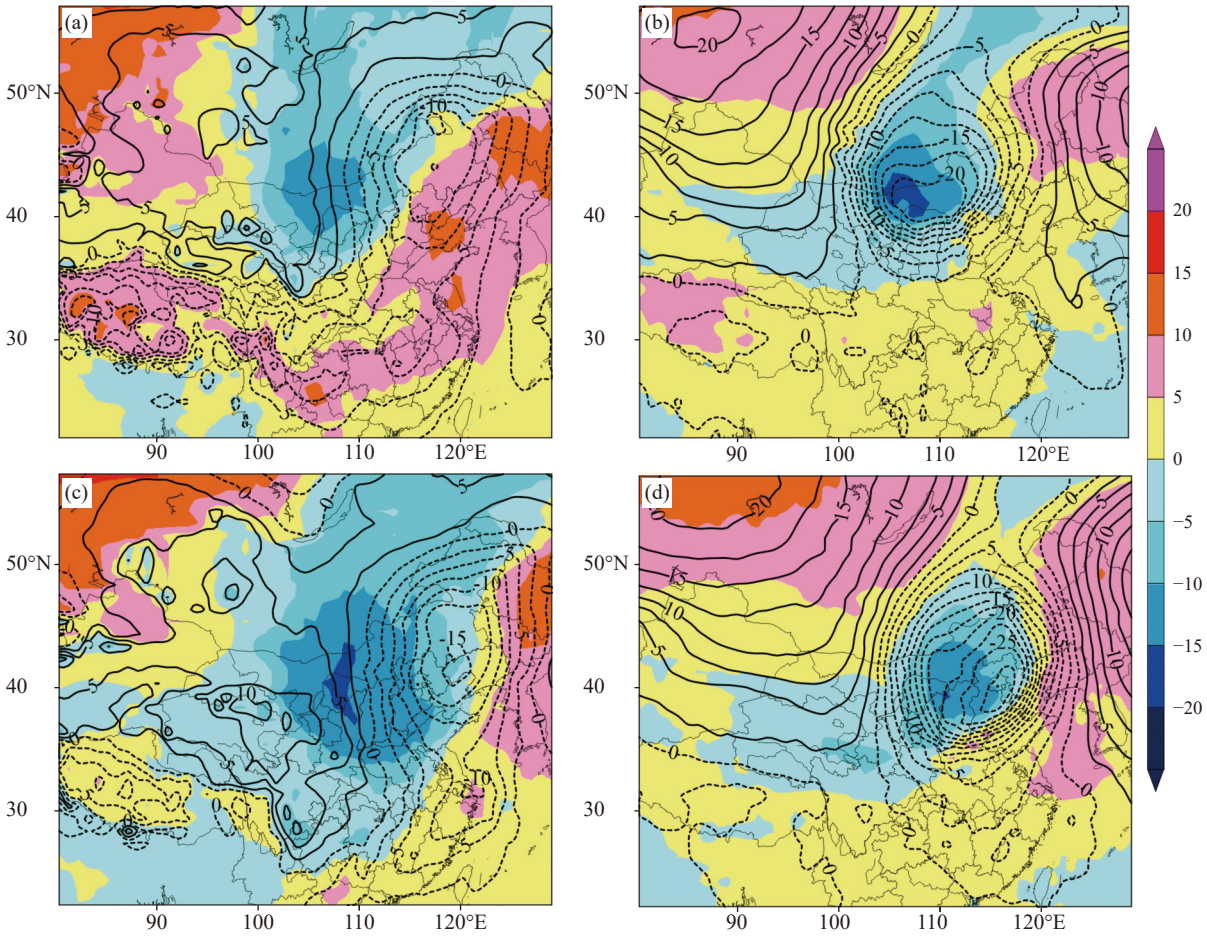



图 6 2025 年 4 月 11 日 20 时 (a, b)、12 日 08 时 (c, d) 850 hPa (a, c) 和 500 hPa (b, d) 位势高度 (等值线,单位: dagpm) 和气温 (填色,单位: ℃) 相对于 1991—2020 年 30 a 逐日气候平均的距平

Fig. 6 Geopotential height (contour, unit: dagpm) and temperature (shaded, unit: ℃) anomalies relative to the 1991-2020 30-year daily climatological mean at (a, c) 850 hPa and (b, d) 500 hPa at (a, b) 20:00 BT on April 11 and (c, d) 08:00 BT on April 12, 2025

的位势高度梯度和强急流。

以上这些极端性成因决定了该类极端大风过程地理分布范围显著大于强对流天气过程, 但从此次大风过程风速大小的极端性看, 显著弱于台风或强对流风暴产生的一些极端大风, 如 2016 年江苏阜宁超强龙卷大风和 2019 年 3 月 21 日广西桂林市临桂区国家级气象观测站观测到的 60.3 $m\cdot s^{-1}$ 强雷暴大风 (翟丽萍等, 2019)。需要指出的是, 从新闻报道的此次极端大风灾情信息看, 极端地面阵风的局地性强, 合理推断应该还有一些极端性大风并未被气象观测站观测到。Pryor 等 (2014) 指出即使部署了密集的气象网络, 也难以充分表征极端强风事件的强度和空间范围。

以上分析表明, 强的冷暖空气异常及其相互对峙形成的强斜压性是此次大风极端性的天气学原因; 异常强的冷暖空气的大范围分布形势及由准地转运动主导的演变过程, 决定了此次大风过程分布范围广和持续时间长的特征。

## 5 结论和讨论

2025 年 4 月 11—13 日, 我国北方和中东部发生了一次极端大风天气过程。本文利用多源资料, 详细分析了此次大风过程的观测特征和成因, 得到如下主要结论:

(1) 此次过程表现为分布范围广、持续时间长、强度大、极端性强的特点, 其过程演变中极大风速不断加强, 同时发生了暴雪、强对流天气、沙尘暴等多种灾害性天气。此次过程有 64 个国家级气象观测站测得的阵风风速破历史极值, 其中河南林州马安脑站最大极大风力达 15 级。

(2) 大范围的南下冷空气形成地面反气旋和高空冷涡, 以及斜压扰动形成的地面温带气旋是导致此次极端大风的主要天气系统。南下的强冷空气在对流层中层 500 hPa 表现为横槽转竖发展为大范围强冷涡。根据准地转理论, 此次过程的主要天气学成因是对流层中层的涡度平流和中低层的温度平流。

(3) 此次过程极端地面阵风的中小尺度成因是显著的垂直风切变形成了活跃的湍流活动, 产生了强垂直混合作用, 中尺度波动产生的强下沉作用, 导致高空大风的动量下传到地面形成强阵风。风廓线雷达观测显示高空强风具有显著的中尺度演变特征, 可能与风场辐合所致的惯性重力波或水平风切变不稳定所致的中小尺度涡旋相关, 尚需要深入分析。

(4) 黄土高原和太行山等大范围高海拔地形产生的热力作用对冷空气前沿大风区的向前推进产生了明显的阻滞影响, 这是因为高原午后受太阳辐射影响地面温度高对冷空气的减弱作用以空气下山的下沉增温作用所致。但高海拔地形作用产生的背风波, 会形成中尺度下沉运动, 使得动量下传产生局地强阵风。

(5) 此次大风过程的极端性原因是极端强的冷暖空气异常及其相互对峙形成了极端的强斜压性和高低空急流; 此次大风过程地理分布范围广和持续时间长的极端性是由异常强的冷暖空气的地理分布范围及由准地转运动主导的演变过程所决定。

本文仅对此次大范围极端大风过程的观测特征、天气尺度和中小尺度成因以及极端性成因作了初步分析。因此, 更深入的气候极端性和中小尺度形成机理还有待进一步研究, 如背风波等惯性重力波的形成机制、开尔文-亥姆霍兹不稳定和湍流的垂直混合作用机制等, 同时也需要进一步加强我国大风极端强度估计及其气候变化特征等研究。

## 参考文献 (References):


范元月,张家国,枚雪彬,等.2022.三峡坝区一次冬季持续性晴空大风的成因分析[J].暴雨灾害,41(2):184−191 . Fan Y Y, Zhang J G, Mei X B, et al. 2022. Analysis on the causes of a continuous clear-sky gale event in winter in the Three Gorges Dam Area [J]. Torrential Rain and Disasters,41(2):184−191 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.02.009

傅云飞,王立羽,张冀祺,等.2025.北半球冬季风暴路径及其降水的研究进展[J].暴雨灾害,44(2):133−143. Fu Y F, Wang L Y, Zhang A Q, et al. 2025. Progress in the study of winter storm track and its precipitation in the Northern Hemisphere [J]. Torrential Rain and Disasters,44(2):133−143 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−203

国家气候中心.2018.中国灾害性天气气候图集 (1961—2015 年) [M]. 北京:气象出版社. National Climate Centre. 2018. Atlas of Disastrous Weather and Climate in China (1961–2015) [M]. Beijing:China Meteorological Press (in Chinese)

卢冰,史永强,王光辉,等.2014.新疆克拉玛依强下坡风暴的机理研究[J].气象学报,72(6):1218−1230. Lu B, Shi Y Q, Wang G H, et al. 2014. Numerical study of severe downslope winds at Kelamayi, XinJiang [J]. Acta Meteorologica Sinica,72(6):1218−1230 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2014.068

罗然,郑永光,陈敏.2020.北京一次罕见夜间突发性强增温事件成因分析[J].气象,46(4):478−489. Luo R, Zheng Y G, Chen M. 2020. Mechanism of a rare night sudden intense warming event in Beijing and surrounding area [J]. Meteoroloigcal Monthly,46(4):478−489 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2020.04.003

盛裴轩,毛节泰,李建国,等.2013.大气物理学[M].北京:北京大学出版社. Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al. 2013. Atmospheric Physics [M]. Beijing: Peking University Press (in Chinese)

陶祖钰,谢安.1989.天气过程诊断分析原理和实践[M].北京:北京大学出版社. Tao Z Y, Xie A. 1989. Principles and Practice of Weather Process Diagnosis and Analysis [M]. Beijing:Peking University Press

(in Chinese)

陶祖钰,周小刚,郑永光.2012.天气预报的理论基础——准地转理论概要及其业务应用[J].气象科技进展,2(3):6−16. Tao Z Y, Zhou X G, Zheng Y G. 2012. Theoretical basis of weather forecasting: quasi-geostrophic theory summary and operational applications [J]. Advances in Meteorological Science and Technology,2(3):6−16 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095−1973.2012.03.001

田付友,张小玲,曹艳察,等.2022.中国中低海拔地区三类强对流天气环境条件的基本气候特征[J].高原气象,41(6):1446−1459. Tian F Y, Zhang X L, Cao Y C, et al. 2022. Baseline climatology of environmental parameters for three severe convective weather phenomena over middle-low areas of China [J]. Plateau Meteorology,41(6):1446−1459 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.00108

涂满红,毛成忠,冯冬霞,等.2017.地面气象观测规范:天气现象[S]. 北京:中国标准出版社. Tu M H, Mao C Z, Feng D X. 2017. Specifications for Surface Meteorological Observation:Weather Phenomena [S]. Beijing:Standards Press of China (in Chinese)

王宗敏,丁一汇,张迎新,等.2012.太行山东麓焚风天气的统计特征和机理分析Ⅱ:背风波对焚风产生和传播影响的个例分析[J].高原气象,31(2):555−561. Wang Z M, Ding Y H, Zhang Y X, et al. 2012. Feature and mechanism of the foehn weather on east slope Taihang Mountains Ⅱ:Case analysis of the effects of lee wave on Foehn occurring and moving [J]. Plateau Meteorology,31(2):555−561 (in Chinese)

翟丽萍,农孟松,梁维亮,等.2019.造成临桂极端大风的超级风暴单体观测分析[J].暴雨灾害,38(4):346−353. Zhai L P, Nong M S, Liang W L, et al. 2019. Analysis of the observations for a supercell causing extreme gale in Lingui [J]. Torrential Rain and Disasters,38(4):346−353 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.04.007

张家诚,林之光.1985.中国气候[M].上海:上海科学技术出版社. Zhang J C, Lin Z G. 1985. Climate in China [M]. Shanghai:Shanghai Science and Technology Press (in Chinese)

张玉玲.1999.中尺度大气动力学引论[M].北京:气象出版社. Zhang Y L. 1999. Introduction to Mesoscale Atmospheric Dynamics [M]. Beijing:China Meteorological Press (in Chinese)

郑永光,陈炯.2022.大气湿对流的类型和深厚湿对流触发机制综述[J].北京大学学报 (自然科学版),58(6):1141−1152. Zheng Y G, Chen J. 2022. Review of atmospheric moist convection categories and triggering mechanism of deep moist convection [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,58(6):1141−1152 (in Chinese). doi:10.13209/j.0479−8023.2022.093

郑永光,黄振强,陈炯,等.2024.对流风暴大气不稳定机制研究的若干问题[J].暴雨灾害,43(3):266−275. Zheng Y G, Huang Z Q, Chen J, et al. 2024. Some issues in studies on the atmospheric instability of convective storms [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):266−275 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−030

郑永光,宋敏敏.2021.冷涡影响中国对流性大风与冰雹的分布特征[J].热带气象学报,37(5-6):710−720. Zheng Y G, Song M M. 2021. Analysis of influence of cold vortexes on distribution of convective high winds and hail in China [J]. Journal of Tropical Meteorology, 37(5-6):710−720 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2021.066

郑永光,田付友,孟智勇,等.2016a. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析[J].气象,42(1):1−13. Zheng Y G, Tian F Y, Meng Z Y, et al. 2016a. Survey and multi-scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of cruise ship “Dongfangzhixing” [J]. Meteorological Monthly,42(1):1−13 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2016.01.001

郑永光,朱文剑,姚聃,等.2016b.风速等级标准与 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷强度估计[J].气象,42(11):1289−1303. Zheng Y G, Zhu W J, Yao D, et al. 2016b. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing County, Jiangsu Province [J]. Meteorological Monthly,42(11):1289−1303 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2016.11.001

Aberson S D, Montgomery M T, Bell M, et al. 2006. Hurricane Isabel (2003): New insights into the physics of intense storms. Part II: extreme localized wind [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,87:1349−1354. doi:10.1175/BAMS−87−10−1349

Atkins N T, Arnott J M, Przybylinski R W, et al. 2004. Vortex structure and evolution within bow echoes. Part I: Single-Doppler and damage analysis of the 29 June 1998 derecho [J]. Monthly Weather Review, 132:2224−2242. doi:10.1175/1520−0493(2004)132,2224:VSAEWB.2.0.CO;2

Booth J F, Rieder H E, Lee D E, et al. 2015. The paths of extratropical cyclones associated with wintertime high-wind events in the northeastern United States [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,54:1871−1885. doi:10.1175/JAMC−D−14−0320.1

Colle B A, Booth J F, Chang E K M. 2015. A review of historical and future changes of extratropical cyclones and associated impacts along the US east coast [J]. Current Climate Change Reports,1:125−143. doi:10.1007/s40641−015−0013−7

Elvidge A D, Renfrew I A. 2016. The causes of foehn warming in the lee of mountains [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 97(3):455−466. doi:10.1175/BAMS−D−14−00194.1

Holton J R. 1972. An Introduction to Dynamic Meteorology [M]. Amsterdam-setts:Academic Press

Lilly D K, Zipser E J. 1972. The front range windstorm of 11 January 1972:A meteorological narrative [J]. Weatherwise,25:56−63. doi:10.1080/00431672.1972.9931577

Lilly D K. 1978. A severe downslope windstorm and aircraft turbulence event induced by a mountain wave [J]. Journal of Atmospheric Science,35:59−77. doi:10.1175/1520−0469(1978)0352.0.CO;2

Pryor S C, Conrick R, Miller C, et al. 2014. Intense and extreme wind speeds observed by anemometer and seismic networks: an eastern U. S. case study [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,53:2417−2429. doi:10.1175/JAMC−D−14−0091.1

(责任编辑 唐永兰)