

侯淑梅,吴雪旭,杨成芳,等.“12·14”山东暴雪过程的极端性特征及成因[J].海洋气象学报,2024,44(2):27-41.  
HOU Shumei, WU Xuexu, YANG Chengfang, et al. Extreme characteristics and causes of “12·14” snowstorm process in Shandong [J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(2): 27-41. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240206001. (in Chinese)

## “12·14”山东暴雪过程的极端性特征及成因

侯淑梅<sup>1,2</sup>, 吴雪旭<sup>1,2</sup>, 杨成芳<sup>1,2</sup>, 高帆<sup>3</sup>, 刘向科<sup>1,2</sup>, 郭子彧<sup>1,2</sup>, 李博<sup>4</sup>, 贾斌<sup>5</sup>

(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2. 山东省气象台, 山东 济南 250031; 3. 济南市气象局, 山东 济南 250102; 4. 菏泽市气象局, 山东 菏泽 274000; 5. 聊城市气象局, 山东 聊城 252000)

**摘要** 利用国家级地面气象观测站、风廓线雷达、X波段双偏振相控阵雷达等多源观测资料和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代大气再分析(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)资料,总结了2023年12月13—14日山东大范围暴雪、局地大暴雪(简称“12·14”暴雪)极端性的特征和成因,并与2021年11月7日山东极端暴雪过程(简称“11·7”暴雪)对比分析了降雪量和雪水比差异的原因。结果表明:(1)典型的暖平流型天气形势是产生极端暴雪有利的环流背景条件,低层切变线和风速辐合区在鲁西北叠加,形成强烈而持久的上升运动。(2)低空急流异常偏强,降水强度不仅与低空急流的强度有关,而且与其厚度有关。当3.0 km高度保持低空急流的强度时,10 m·s<sup>-1</sup>风速到达的高度越低,降雪强度越大。(3)700 hPa比湿超过4 g·kg<sup>-1</sup>、850 hPa比湿超过3 g·kg<sup>-1</sup>的持续时间均长达10 h以上,为极端暴雪过程提供了充足的水汽。850 hPa比湿和比湿平流远远高于“12·14”暴雪过程,是“11·7”过程最大累计降雪量大于“12·14”过程的原因之一。(4)“12·14”暴雪过程垂直运动旺盛,最大上升速度位于不稳定层顶的前沿,处于-20~-10℃层,有利于树枝状冰晶生长,降雪效率高。对流层整层温度低于0℃,雪花下落过程中没有融化,雪水比高,积雪深度大。“11·7”暴雪过程初期最大上升运动中心高度低,形成更多柱状冰晶,经过暖层时融化,雪水比低,积雪深度小于“12·14”暴雪过程。

**关键词** 极端暴雪;低空急流异常;强辐合;雪水比;降雪效率

中图分类号: P458 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)02-0027-15

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240206001

## Extreme characteristics and causes of “12·14” snowstorm process in Shandong

HOU Shumei<sup>1,2</sup>, WU Xuexu<sup>1,2</sup>, YANG Chengfang<sup>1,2</sup>, GAO Fan<sup>3</sup>,  
LIU Xiangke<sup>1,2</sup>, GUO Ziyu<sup>1,2</sup>, LI Bo<sup>4</sup>, JIA Bin<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China; 3. Jinan Meteorological Bureau, Jinan 250102, China; 4. Heze Meteorological Bureau, Heze 274000, China; 5. Liaocheng Meteorological Bureau, Liaocheng 252000, China)

**Abstract** Multi-source observation data, such as national meteorological observation station, wind profile radar, X-band dual-polarization phased array radar, and ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Reanalysis v5 (ERA5) are used to analyze the characteristics and causes of

收稿日期: 2024-02-06; 修回日期: 2024-04-28

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2021MD010, ZR2022MD095, ZR2023MD118, ZR2021MD121); 山东省气象局创新团队项目(SDCXTD2021-1, SDCXTD2023-1); 山东省气象局科研项目(2022sdqxz11, 2016sdqxz01, SDTQ2023-01, 2023sdqxm09, 2023sdqxm02)

第一作者简介: 侯淑梅, 女, 正高级工程师, 研究方向为强对流等灾害性天气形成机理及预报, shmh0808@163.com。

the large-scale snowstorm (partially severe snowstorm) process in Shandong from 13 to 14 December 2023 (“12·14” snowstorm for short), which is compared with the extreme snowstorm process on 7 November 2021 (“11·7” snowstorm for short) to study the reasons for differences in snowfall amount and snow-to-liquid ratio. The results are as follows. (1) The synoptic situation of typical warm advection type is a favorable circulation background for extreme snowstorm. The low-level shear line and wind speed convergence are overlapped in the northwest of Shandong Province, forming a strong and persistent ascending motion. (2) The low-level jet is abnormally strong, and the precipitation intensity is not only related to the intensity of the low-level jet, but also to its thickness. When the intensity of the low-level jet maintains at the height of 3.0 km, the lower the height of the  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  wind speed, the greater the snowfall intensity. (3) The duration of specific humidity exceeding  $4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  at 700 hPa and  $3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  at 850 hPa is both over 10 h, providing sufficient water vapor for the extreme snowstorm process. The 850-hPa specific humidity and specific humidity advection of the “11·7” snowstorm are much higher than those of the “12·14” snowstorm, which is one of the factors contributing to the maximum cumulative snowfall of the “11·7” snowstorm being greater than that of the “12·14” snowstorm. (4) For the “12·14” snowstorm, the vertical motion is vigorous, the maximum ascending velocity is located at the forefront of the unstable layer, and the temperature is between  $-20$  and  $-10$   $^{\circ}\text{C}$ , which are all conducive to the growth of dendritic ice crystals and high snowfall efficiency. The temperature of the entire troposphere is below  $0$   $^{\circ}\text{C}$ , and the snowflakes do not melt during the falling process, so the snow-to-liquid ratio is high, and the depth of snow is large. For the “11·7” snowstorm, the center of the maximum ascending motion during the early stage is lower, forming more columnar ice crystals that melt when passing through the warm layer. Therefore, the snow-to-liquid ratio is lower and its snow depth is smaller than that of the “12·14” snowstorm.

**Keywords** extreme snowstorm; low-level jet anomaly; severe convergence; snow-to-liquid ratio; snowfall efficiency

## 引言

暴雪是中国北方冬季主要的灾害性天气之一,极端暴雪由于雪量大、积雪深,对交通、电力、能源、设施农业等领域造成很大影响。例如,2020年11月17—19日,内蒙古极端暴雪过程导致高速公路关闭,铁路、民航暂停运输,部分牧区发生白灾,牲畜食草困难、幼畜冻死,通辽电力设施受损严重,出现大面积停电,暴雪给人民生活造成极大影响,经济损失严重<sup>[1]</sup>。近些年来山东出现过多次极端暴雪事件,例如2013年4月19—20日山东北部的极端暴雪过程,多站降雪刷新了有气象记录以来4月终雪日、降水量及积雪深度纪录<sup>[2]</sup>。2015年11月23—24日鲁南极端暴雪过程,多站降雪量刷新了自1962年有气象记录以来11月的最大积雪深度纪录<sup>[3]</sup>。极端暴雪事件频繁出现,引起气象专家的广泛关注,开展了一系列的相关研究。研究表明,江淮气旋和回流形势是山东极端暴雪发生的两类主要天气系统,并且均存在低空急流<sup>[4]</sup>。强降雪阶段,中低层水汽几乎接近饱和状态,深厚湿层有利于高效率强降雪的产生<sup>[1]</sup>。易笑园

等<sup>[5]</sup>通过对2020年华北地区一次暴风雪的研究发现,研究区域内的水汽绝大部分来源于850 hPa以下的三股气流,其中东南支气流对水汽的贡献最大,西南支气流携带的水汽最为深厚。伴有“雷打雪”现象(一边打雷,一边降雪)<sup>[6-7]</sup>的降雪过程容易出现极端暴雪<sup>[8-9]</sup>,但雷暴是预报中的难点,容易漏报<sup>[10-12]</sup>,导致降雪强度的预报误差增大。

2023年12月13—14日,山东16市普遍出现雨雪天气,鲁西北和鲁中地区出现暴雪,部分地区出现大暴雪。此次过程呈现降雪范围广、降雪强度大、降雪量和积雪深度极端性明显、雪水比大、降水相态复杂并伴有“雷打雪”现象等特征,为有气象记录以来山东12月历史之最,被评为2023年山东十大天气气候事件之一,以下简称“12·14”暴雪过程。受降雪和持续低温影响,12月14日,济南、德州、聊城等地部分高速收费站临时关闭,多趟途经济南列车停运。14—22日,泰山盘道、旅游公路等出现大面积反复结冰,泰山景区暂停开放,社会影响较大。2021年11月7日,山东也出现了一次极端暴雪过程<sup>[12-13]</sup>,与“12·14”暴雪过程相似,暴雪区也位于鲁

西北和鲁中地区,以下简称“11·7”暴雪过程。尽管对于极端暴雪已开展了一系列卓有成效的研究<sup>[4-17]</sup>,但每一次极端暴雪过程均有其独特的一面,暴雪落区、相态转换、积雪深度、雷暴等仍然是预报中的难点。“12·14”和“11·7”两次暴雪的落区有重叠,且都呈现出积雪深度突破历史极值的特点,但两次过程的极端特征和天气形势又有很多不同,“11·7”过程累计最大降雪量大于“12·14”过程,但最大积雪深度却小于“12·14”过程。本文重点凝练“12·14”暴雪过程的极端性特征,利用多源观测资料和再分析资料,从雪水比、低空急流异常、水汽来源、降雪效率等方面分析造成极端暴雪的成因,并与“11·7”暴雪过程进行对比,研究暴雪落区相同的个例,降雪量和积雪深度差异的原因,提炼影响降雪量和积雪深度的关键因子,为山东极端暴雪预报提供参考,提高暴雪精细化预报能力。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

使用的实况资料包括山东国家级地面气象观测站逐小时降水、气温、天气现象、积雪深度(2023年12月14日06:00—15日08:00逐小时加密观测,2021年11月6、7、8日08:00观测)(北京时,下同)和雨滴谱等观测资料,主要用于分析降雪实况、降水相态等特征。根据参考文献<sup>[18-20]</sup>数据质量控制方法和计算公式,雨滴谱数据剔除了2个最小直径档(即直径小于0.25 mm)的粒子和下落末速度大于 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的粒子,计算了单位体积、单位直径间隔内的粒子分布谱 $N(D)$ (单位为 $\text{m}^{-3}\cdot\text{mm}^{-1}$ )和单位体积、单位速度间隔内的粒子速度分布谱 $N(V)$ (单位为 $\text{m}^{-3}\cdot(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{-1}$ ),主要用于分析降雪相态转换过程中的雨滴谱特征。多源观测资料有闪电、济南X波段双偏振相控阵雷达(空间分辨率为 $30 \text{ m}\times 30 \text{ m}$ ,时间分辨率为1 min)、济南平阴站风廓线雷达资料,主要用于分析降雪过程中的对流特征和低空急流的演变,其中基于X波段双偏振相控阵雷达资料利用三维变分法反演了垂直速度<sup>[21]</sup>,用来分析对流发生时上升运动的强度。上述实况观测资料来源于气象大数据云平台·天擎系统。

另外,使用了欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,

ECMWF)第五代大气再分析(ECMWF Reanalysis v5, ERA5; <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>;空间分辨率为 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$ ,时间分辨率为1 h)资料,用于分析产生暴雪的环境场特征和气候平均值。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 标准化距平

利用ERA5资料计算标准化距平,见公式(1)。

$$x_{\sigma(i,j,t)} = \frac{(x_{i,j,t} - \overline{x_{i,j}})}{\sigma_{i,j}} = \frac{(x_{i,j,t} - \overline{x_{i,j}})}{\sqrt{1/30 \sum_{k=1}^{30} (x_{i,j,k} - \overline{x_{i,j}})^2}}, \quad (1)$$

其中: $x_{\sigma(i,j,t)}$ 代表气象要素 $x$ 在 $t$ 时刻的标准化距平, $i$ 和 $j$ 分别代表格点纬向和经向位置, $\sigma_{i,j}$ 代表该要素的标准差, $x_{i,j,t}$ 代表该要素在 $t$ 时刻的格点值, $\overline{x_{i,j}}$ 代表气象要素 $x$ 在1991—2020年30 a的12月气候平均值, $x_{i,j,k}$ 代表该要素1991—2020年第 $k$ 年12月的月平均值。 $x_{\sigma(i,j,t)}$ 是一个无量纲数,可以去除气象要素的季节差异,反映气象要素 $x$ 偏离气候平均值的异常程度,绝对值越大,异常越明显<sup>[22-25]</sup>,研究表明,天气系统的异常程度更能代表动力和热力强迫的强度。利用公式(1)对2023年12月14日08:00—20:00关注区域内每个格点计算700 hPa和850 hPa全风速的逐小时格点标准化距平,分析低空急流异常在极端暴雪过程中的作用。

#### 1.2.2 雪水比

雪水比<sup>[26-29]</sup>即某时间段内降雪天气产生的新增积雪深度与降雪量之间的比值,单位为 $\text{cm}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。为便于比较,选取2023年12月14日08:00—15日08:00和2021年11月7日08:00—8日08:00的24 h新增积雪深度和累计降雪量,计算二者的比值分别作为“12·14”和“11·7”暴雪过程的雪水比。

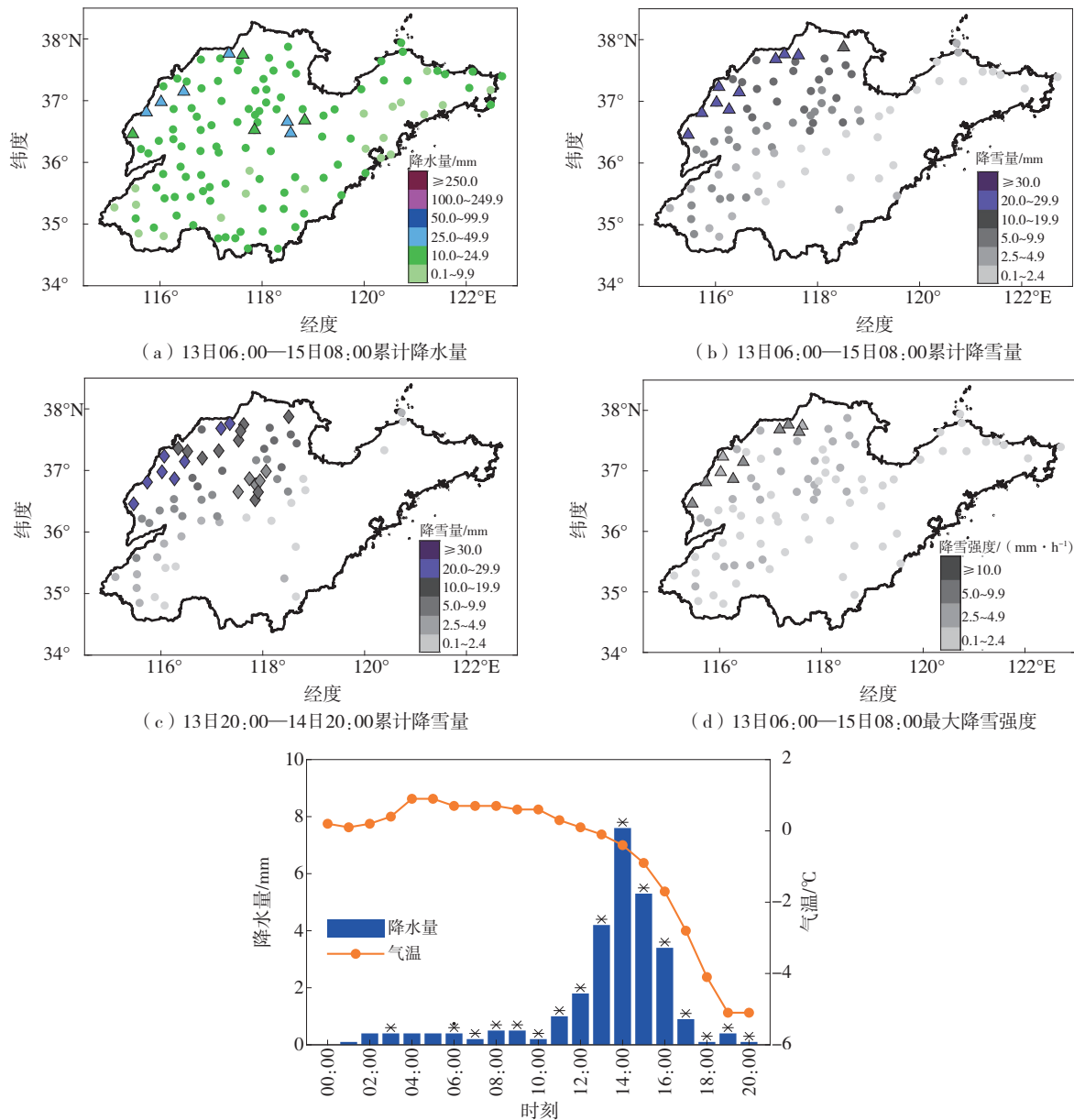
## 2 暴雪极端性特征

“12·14”暴雪过程,从13日06:00菏泽出现降水开始,到15日08:00降水基本结束。13日白天到夜间,鲁西北、鲁中和鲁南的部分地区出现小雪或雨夹雪,主要降雪时段为14日白天,14日夜间降雪区逐渐东移减弱。整个过程呈现降雪范围广、降雪量极端、降雪强度大、积雪深度极端、雪水比高、降水相态复杂等特征,降雪过程中还出现了区域性“雷打雪”现象。下面将对以上特征分别进行论述。

2.1 降水范围、降雪量和降雪强度

“12·14”暴雪过程降水范围广,降雪量极端,降雪强度大。13日06:00—15日08:00,全省平均降水量为14.7 mm,最大降水量出现在平原站,为28.8 mm(图1a),有6站降水量达到或超过25.0 mm。10.0 mm以上的降雪量主要位于鲁西北和鲁中的北部地区(图1b),累计降雪量达到或超过20.0 mm的有9站,10.0~20.0 mm的有27站,最大降雪量出现在平原站,为27.1 mm。

13日20:00—14日20:00(图1c),全省71站出现降雪,其中平原(26.7 mm)、临清(24.4 mm)、夏津(23.6 mm)等8站达到大暴雪(20.0 mm或以上)等级,无棣(19.2 mm)、阳信(17.4 mm)等20站达到暴雪等级。暴雪及以上测站占全省总站数的22.8%,大雪测站占总站数的15.4%。临清(24.4 mm)、冠县(23.2 mm)、高唐(22.0 mm)等23站(占全省总站数123站的18.7%)降水量突破本站12月历史极值(表1)。



a、b、d中三角形—前10名站点; c中菱形—突破历史极值站点; e中\*—雪, \*—雨夹雪。

图1 “12·14”暴雪过程降水特征及2 m气温变化

Fig.1 Characteristics of precipitation of the snowstorm process in Shandong from 13 to 14 December 2023 (“12·14” snowstorm for short) and variation of 2-m temperature

表1 2023年12月13日06:00—15日08:00山东累计降雪量前10名及13日20:00—14日20:00 24 h降水量突破本站12月历史极值前10名

Table 1 Accumulated snowfall of the top 10 stations from 06:00 BJT 13 to 08:00 BJT 15 December in Shandong and 24-h snowfall (from 20:00 BJT 13 to 20:00 BJT 14 December 2023) of the top 10 stations with precipitation exceeding the historical extreme value in December

序号	13日06:00—15日08:00		13日20:00—14日20:00		
	累计降雪量前10名站点	累计降雪量/mm	24 h降水量突破本站12月历史极值前10名站点	24 h降水量/mm	24 h降雪量/mm
1	德州平原	27.1	德州平原	28.4	26.7
2	德州夏津	26.4	德州庆云	24.7	20.7
3	聊城临清	25.8	聊城临清	24.4	24.4
4	聊城冠县	23.2	德州夏津	24.3	23.7
5	德州武城	22.1	聊城冠县	23.2	23.2
6	德州庆云	21.8	聊城高唐	22.0	21.1
7	聊城高唐	21.5	滨州无棣	22.0	19.2
8	德州乐陵	21.5	滨州阳信	21.5	17.4
9	滨州无棣	20.3	淄博博山	21.4	12.1
10	东营河口	19.8	德州武城	21.2	21.2

由小时最大降雪量的分布(图1d)可以发现,“12·14”暴雪过程中,降雪地区最大降雪强度大部分地区超过 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,降雪强度自西向东逐渐减小,最大降雪强度 $7.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 出现在德州平原站。由表2可见,有7站的最大降雪强度超过 $5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,达到大雪量级,最大降雪强度的时间集中在13:00—16:00。统计不同区间降雪强度的站次数(表3)发现,0.1~2.4  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的有496站次,2.5~4.9  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的有74站次,5.0~10.0  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的有10站次。由平原站逐小时降水量(图1e)可见,该站降雪时间主要集中在11:00—16:00,降雪强度超过 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的时间长达6 h,尤其是14时和15时小时降雪量分别为7.6 mm和5.3 mm,在2 h内达到暴雪量级。

表2 最大降雪强度前10名  
Table 2 Top 10 maximum snowfall intensity

序号	站名	最大降雪强度/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	出现时间
1	德州平原	7.6	14时
2	聊城冠县	6.2	14时
3	聊城临清	5.5	13时
4	德州庆云	5.4	15时
5	聊城高唐	5.1	15时
6	德州乐陵	5.1	15时
7	滨州阳信	5.0	16时
8	德州武城	4.8	13时
9	滨州无棣	4.7	16时
10	德州夏津	4.1	14时

## 2.2 积雪深度和雪水比

“12·14”暴雪过程中,67站有积雪,占总站数的

54.5%。积雪深度极端,共有41站最大积雪深度达到或超过5 cm,其中21站的积雪深度达到或超过10 cm,德州夏津和平原最大为23 cm,积雪深度。积雪深度极端10 cm以上测站的降雪量均超过10.0 mm。平原、夏津、河口3站突破本站积雪深度历史极值,陵城、临清2站与本站历史极值持平。

表3 不同区间降雪强度的站次数  
Table 3 The number of stations with snowfall intensity in different intervals

降雪强度区间/( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	站次数/站
0.1~2.4	496
2.5~4.9	74
5.0~10.0	10
合计	580

2023年12月14日08:00—15日08:00累计最大降雪量为25.5 mm,出现在德州平原站,新增最大积雪深度23 cm出现在德州夏津站。将“12·14”暴雪过程(图2a)与“11·7”暴雪过程(图2b)比较,前者雪水比最大值主要位于鲁西北地区,范围为 $0.6 \sim 1.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,与图1c暴雪区的分布一致。24 h新增积雪深度前10名的测站中(表4),雪水比排在前三位的是陵城( $1.45 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ )、临邑( $1.20 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ )、夏津( $0.91 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ )。统计研究<sup>[27]</sup>表明,山东江淮气旋暴雪的雪水比中位数为 $0.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,25%~75%分位数为 $0.3 \sim 0.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,”12·14”暴雪过程积雪深度前10名测站的雪水比平均值远大于气候统计的75%分位数,积雪深度10 cm以上测站的雪水比平均值与75%分位数相当。

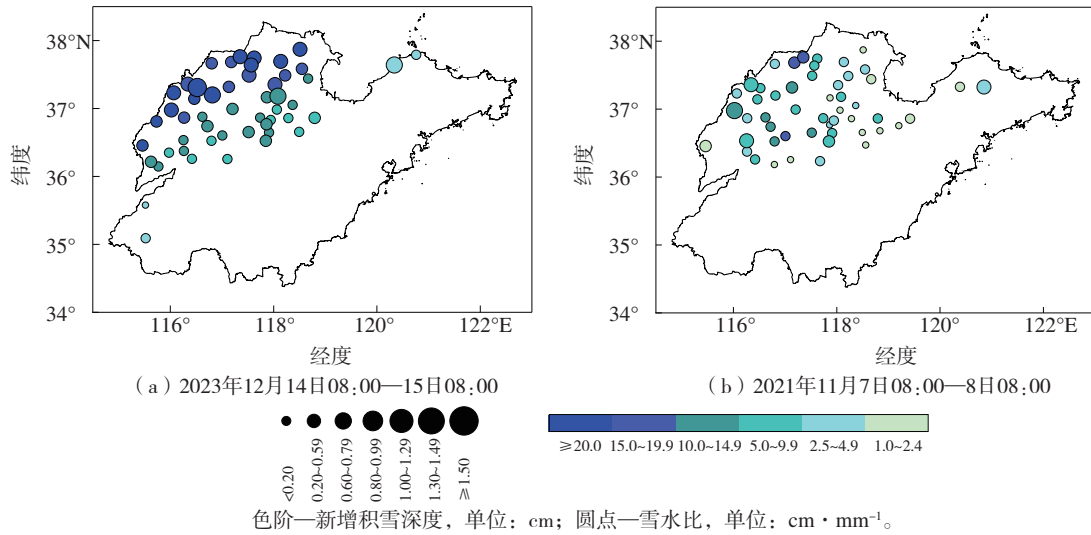


图2 “12·14”和“11·7”暴雪过程24 h新增积雪深度和雪水比  
Fig.2 Newly increased snow depth and snow-to-liquid ratio in 24 h during the “12·14” snowstorm and the snowstorm process on 7 November 2021 (“11·7” snowstorm for short)

表4 “12·14”和“11·7”暴雪过程24 h新增积雪深度前10名及雪水比

Table 4 Top 10 newly increased snow depth and snow-to-liquid ratio during the “12·14” and “11·7” snowstorms

序号	“12·14”暴雪			“11·7”暴雪		
	站名	24 h 新增积雪 深度/cm	雪水比/ (cm·mm <sup>-1</sup> )	站名	24 h 新增积雪 深度/cm	雪水比/ (cm·mm <sup>-1</sup> )
1	德州夏津	23	0.91	济南站	18	0.55
2	德州平原	20	0.78	德州庆云	16	0.77
3	德州庆云	19	0.89	德州乐陵	15	0.63
4	德州陵城	18	1.45	济南长清	14	0.48
5	滨州无棣	17	0.85	济南商河	14	0.62
6	德州临邑	17	1.20	德州禹城	13	0.58
7	聊城临清	17	0.70	济南章丘	12	0.43
8	聊城冠县	16	0.69	德州齐河	11	0.56
9	德州武城	16	0.82	德州夏津	10	1.01
10	东营河口	16	0.86	淄博淄川	9	0.49
	前10名	17.9	0.91	前10名	13.2	0.61
平均	积雪深度10 cm 以上21站	15.7	0.83	积雪深度10 cm 以上9站	13.7	0.62

“11·7”暴雪过程的暴雪落区与“12·14”暴雪过程相似,7日00:00—23:00,累计降雪量达到或超过20.0 mm的有22站,10.0~20.0 mm的有25站,最大降雪量41.8 mm也出现在平原站;56站有积雪,最大积雪深度为20 cm。2021年11月7日08:00—8日08:00累计最大降雪量为32.8 mm,出现在济南站,新增最大积雪深度18 cm也出现在济南站。由图2可见,“12·14”和“11·7”两个暴雪过程24 h新增积雪深度区域高度重合。积雪深度前10名的平均值,“12·14”和“11·7”暴雪过程分别为17.9 cm、13.2 cm,对应的雪水比平均值分别为0.91 cm·mm<sup>-1</sup>和0.61 cm·mm<sup>-1</sup>;积雪深度10 cm(含)以上的平均值,“12·14”和“11·7”暴雪过程分别为15.7 cm、

13.7 cm,对应的平均雪水比分别为0.83 cm·mm<sup>-1</sup>和0.62 cm·mm<sup>-1</sup>(表4)。可见,“11·7”暴雪过程的累计降雪量更大,但“12·14”暴雪过程的积雪深度更厚。将在3.3节和3.4节对比分析“11·7”暴雪过程的降雪量大于“12·14”但积雪深度却小于“12·14”暴雪过程的原因,提炼影响降雪量和积雪深度的关键因子。

### 2.3 降水相态和道路结冰情况

山东地处中纬度地区,南北气流在此交汇,降雪过程经常存在降水相态的转换<sup>[30-31]</sup>。“12·14”暴雪过程中,13日白天到夜间,全省大部地区出现小雨转雨夹雪或小雪,其中聊城、德州、济南3市的部分地区和泰山等地出现冻雨,14日白天到夜间,全省

大部地区经历了雨、雨夹雪、冰粒和纯雪等复杂降水相态,其中威海文登和泰山等地出现短暂冻雨。由于气温低,冰粒等降水粒子在地面迅速冻结,导致降雪地区出现明显道路结冰,给交通带来较大影响。

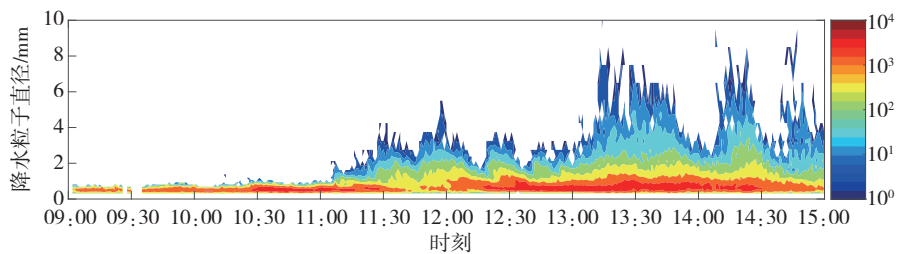
由聊城站雨滴谱仪的观测可见,14日09:00—11:00,降水相态为雨,粒子直径较小,主要集中在0.5~0.7 mm;谱宽较窄(图3a),下落末速度集中在1.0~4.0  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图3b)。10:30—11:00,降水粒子数明显增加,粒子谱宽略有增大,但仍集中在1.0 mm以下,1.0~3.0  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的粒子数浓度增大,同时速度谱宽呈现增大趋势,实况仍为雨(图3c),但11时降水量(0.9 mm)比10时(0.2 mm)明显增大,说明降水粒子数量增多导致雨强增大。11:00—13:00,降水相态为过渡阶段,粒子谱宽明显增大,粒子直径为0.5~4.0 mm,最大直径超过5.0 mm,但多数粒子仍集中在0.5~1.5 mm;下落末速度谱宽范围增大,谱宽最大的是11:00—12:00,这与12时小时降水量最大有关,1 h降水量为2.2 mm,虽然大部分粒子下落末速度集中在1~3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,但最大值超过7  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,说明其间有较大直径的液态雨滴下落。随着降水相态逐渐转为纯雪,12:00—13:00,高浓度粒子的下落末速度呈下降趋势,集中区间从11:00—12:00的1.5~3.5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 逐渐下降到0.5~3.0  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,且1.0 mm以下粒子数增加,1.0~2.0 mm粒子数,尤其是3.0 mm以上粒子数减少,表现在13时降水量(1.9 mm)略小于12时(2.2 mm)。13时以后,降水相态转为纯雪,粒子谱宽有显著的跳跃式增长,虽然大部分粒子直径仍集中在0.5~1.5 mm,但最大粒子直径超过8.0 mm;下落末速度谱宽减小并且相对稳

定,波动幅度较小,这是因为一方面降水相态转为纯雪,粒子质量的一致性较好,另一方面13:00—15:00降雪强度相同,均为1.3  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,因此雪粒子浓度和下落末速度相对比较稳定,下落末速度最大值由过渡阶段的7.5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至5.5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,高浓度粒子集中区间为1.0~2.0  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。雨夹雪阶段雨强最大,下落速度最大值也最大,但粒子直径最大值小于纯雪阶段,说明此次降雪过程中大雪花出现在纯雪阶段,而大雨滴出现在雨夹雪阶段。

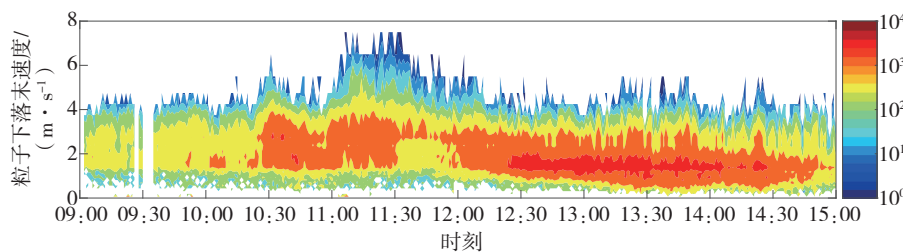
可见,雨夹雪转纯雪阶段雨滴谱宽呈跳跃式增长,高浓度粒子的下落末速度呈下降趋势,雨滴谱宽和速度谱宽分别在纯雪和雨夹雪阶段最大。同一相态期间雨滴谱宽和速度谱宽相对稳定,雨强随粒子数浓度增大而增大。雨转雨夹雪阶段,雨滴谱宽与速度谱宽均呈增大趋势,这与雨强增大有关,因此不能仅从雨滴谱和速度谱判断相态。

#### 2.4 对流和“雷打雪”情况

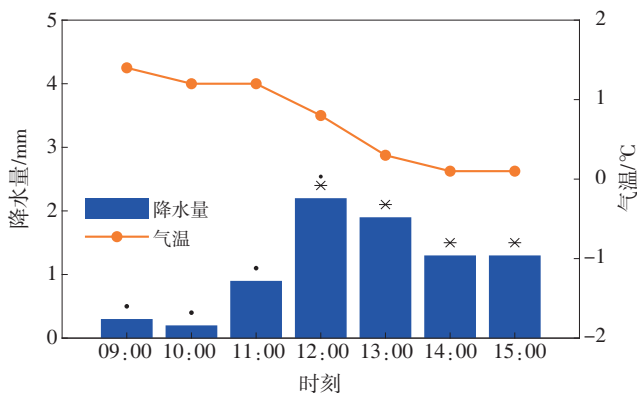
2023年12月14日11:00—16:00,从河南北部到山东西部出现大范围的闪电(图4),即“雷打雪”现象。闪电最早在14日04时出现在山西、陕西和河南境内,随着低空急流的增强,闪电逐渐向东北方向移动,11时从鲁西北进入山东,持续到16时,其间12:00—15:00强对流发展旺盛,分布区域集中在山东中西部,与“11·7”暴雪过程的闪电落区相似<sup>[12]</sup>,但范围略大。对比图1c可见,对流区域与暴雪区高度重合,与统计结果<sup>[32]</sup>一致。由表2可知,最大降雪强度主要出现在“雷打雪”阶段,说明对流造成降雪强度大是此次极端暴雪的主要原因之一。



(a) 粒子分布谱



(b) 粒子速度分布谱

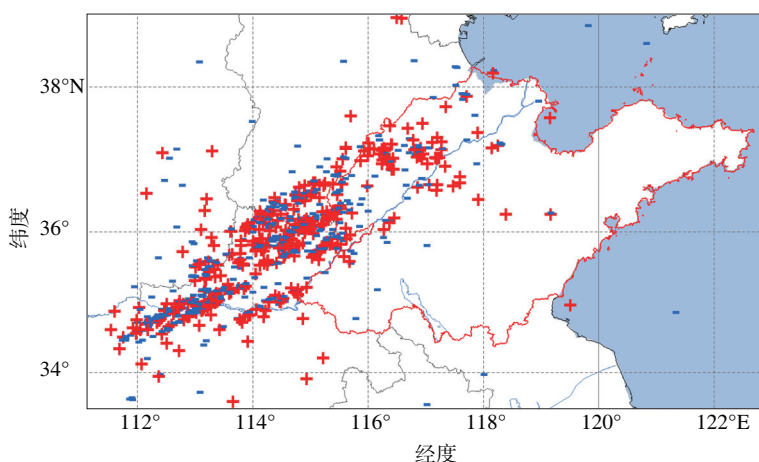


(c) 逐小时降水量、降水相态和2 m气温

a中色阶—雨滴谱数浓度, 单位:  $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ ; b中色阶—雨滴速度谱数浓度, 单位:  $\text{m}^{-3} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ ; c中黑色圆点—雨, \*—雪, \*—雨夹雪。

图3 2023年12月14日09:00—15:00聊城站降水特征及2 m气温变化

Fig.3 Characteristics of precipitation at Liaocheng station from 09:00 BJT to 15:00 BJT 14 December 2023 and variation of 2-m temperature



红色加号—正闪; 蓝色减号—负闪。

图4 2023年12月14日11:00—16:00闪电分布

Fig.4 Distribution of lightning from 11:00 BJT to 16:00 BJT 14 December 2023

### 3 极端天气成因

#### 3.1 有利的环流形势

第2节的分析表明,“12·14”暴雪的主要降雪时段为14日白天,尤其是14日11:00—16:00“雷打雪”阶段,因此本节重点分析14日11:00的天气形势。

11:00 500 hPa(图5a),高空槽位于新疆北部,高压脊位于华北北部到东北地区。700 hPa形势与500 hPa相似,但在高空槽前河西走廊一带分裂出一个短波槽,并且在山西北部到河北中部一带形成一条纬向切变线,暴雪区位于纬向切变线南侧的低空急流顶端。从华南到华北为一致的西南风低空急

流,急流宽度高达12经距,急流轴的顶端位于鲁西北地区。急流带上最大风速高达 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,形成强烈的暖湿平流,源源不断地将水汽输送到山东暴雪区,属于典型的暖平流型暴雪天气形势<sup>[32-33]</sup>。由08:00—12:00 700 hPa低空急流和散度的演变(图略)可见,随着低空急流北上,急流顶端的辐合区以及急流脉动产生的辐合区逐渐从西南向东北方向移动,11:00山东中南部为辐合上升区,最大上升速度中心( $-8 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )位于聊城,12:00最大上升速度中心移至德州,平原站处于上升运动中心。11:00 850 hPa(图5b),山东西部为一条东北—西南走向的切变线,切变线东侧为东南风低空急流,最大风速为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,将来自黄海的暖湿空气输送到鲁西



北地区,在鲁西北—鲁中一带形成水汽辐合中心及上升运动中心,二者叠加区域正好位于平原站附近,平原站南部最大上升速度中心为 $-8 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与其对应的水汽通量散度为 $-2 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。925 hPa以下鲁西北地区受冷高压前部的东北风控制,随着冷空气南下,在鲁西北的风速辐合区也形成

了上升运动(图略)。综上所述,850 hPa切变线辐合、925 hPa以下东北风速辐合以及700 hPa西南低空急流辐合在鲁西北地区叠加,形成强烈而持久的上升运动,抬升暖湿空气触发对流,同时700 hPa西南风低空急流和850 hPa东南风低空急流共同作用,为暴雪区提供了源源不断的水汽。

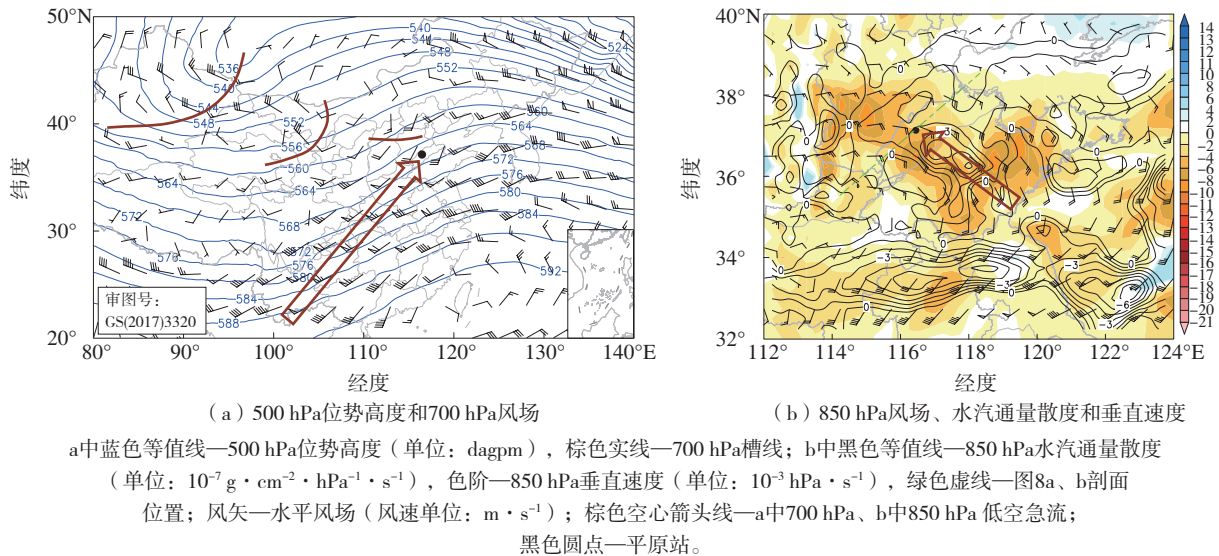


图5 2023年12月14日11:00高空天气形势场

Fig.5 Upper-level synoptic condition at 11:00 BJT 14 December 2023

### 3.2 异常偏强的低空急流

由济南平阴站风廓线雷达09:00—20:00的时序图(图6a)可以发现,整个降雪过程可以分为以下6个阶段。第1阶段,09:00之前低空急流还没有到达平阴,平阴站小时降水量在1.0 mm以下。第2阶段(09:00—13:00),高空 $17 \sim 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风速区高度迅速下降,动量下传, $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速区高度第一次下降到最低高度2.8 km,同时1~2 km风速随之增大到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,地面1 h降水量逐渐增大到峰值(13:00降水量为3.4 mm,相态为雨夹雪)。第3阶段(13:00—13:30), $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速区高度上升到3.2 km,同时1~2 km高度风速由 $6 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降到 $2 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,地面14时小时降水量下降到1.0 mm(相态为雪,之后相态均为雪)。第4阶段(14:00—16:00),高空大风速区高度再次下降, $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速第二次到达最低高度2.2 km,同时 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速高度降至3.0 km高度,但 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速高度最低为1.8 km,地面雨强再次增大到 $1.0 \sim 2.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,但低于13:00( $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速高度最低为1.2 km)。第5阶段(16:00—18:30), $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速区高度稳定在

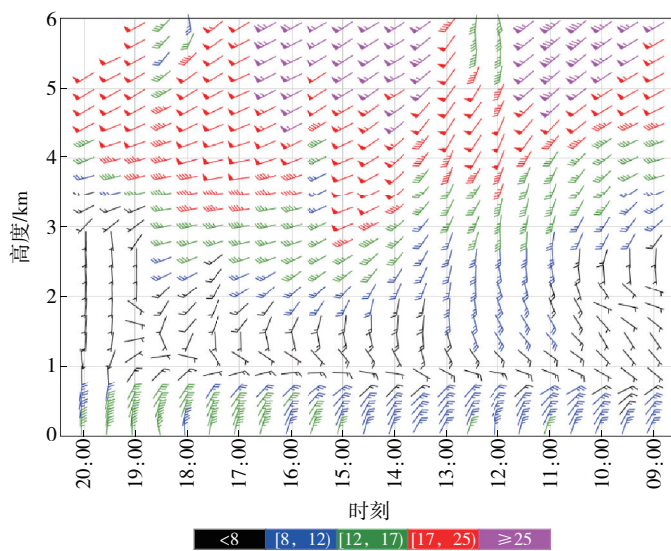
2.5 km高度,但2.0 km以下风速逐渐减弱到 $2 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,雨强降到 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下。第6阶段(19:00—20:00), $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风速区高度迅速抬升到4.0 km高度,低空急流消失,3.0 km以下风速降到 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,降水停止。“11·7”暴雪过程中强降雪阶段也存在高空大风速区高度下降, $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速区高度降至2.0 km以下、低空急流增强的特征<sup>[13]</sup>。可见,异常偏强的低空急流为暴雪提供了充足的水汽来源,强降水不仅与低空急流的强度有关,而且与低空急流的厚度有关。当高空大于 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风速区高度下降,低层风速增大, $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速区高度下降到3.0 km以下,降水强度随之增强。当3.0 km高度保持低空急流的强度时, $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速到达2.0 km高度或以下时,雨强较大, $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速高度越低,雨强越大。当 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速高度下降到1.2 km,同时3.0 km风速达 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,雨强达到最大 $3.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;当3.0 km仍维持低空急流强度,但 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速降高度升至 $1.8 \sim 2.0 \text{ km}$ 时,雨强减弱到 $1.0 \sim 2.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;当3.0 km高度维持低空急流,但2.0 km以下风速降到 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下时,雨强减弱到

1.0 mm·h<sup>-1</sup>以下;当3.0 km以下风速减至8 m·s<sup>-1</sup>以下时,降水停止。

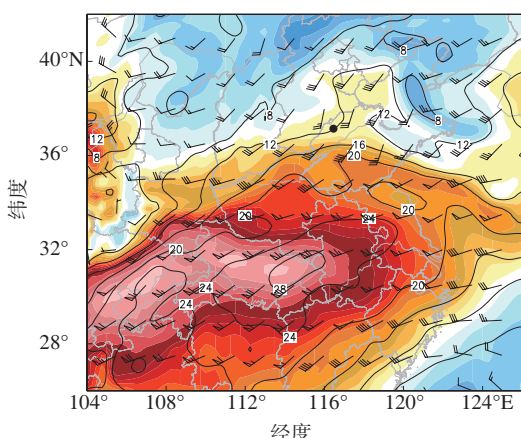
研究<sup>[23-25]</sup>表明,极端天气往往是在异常的天气背景下产生的,3.1节和上述分析表明,700 hPa和850 hPa低空急流为“12·14”暴雪过程提供充足的水汽来源,因此本小节重点分析700 hPa和850 hPa低空急流的异常程度。由表2可知,最大小时降雪量主要出现在13:00—16:00,因此首先分析13:00的异常程度。

由图6b可见,13:00,700 hPa强盛的西南风低空急流一直伸到山东,风速最大处位于湖北,为28 m·s<sup>-1</sup>,异常程度高达20倍标准差(记为“20σ”),

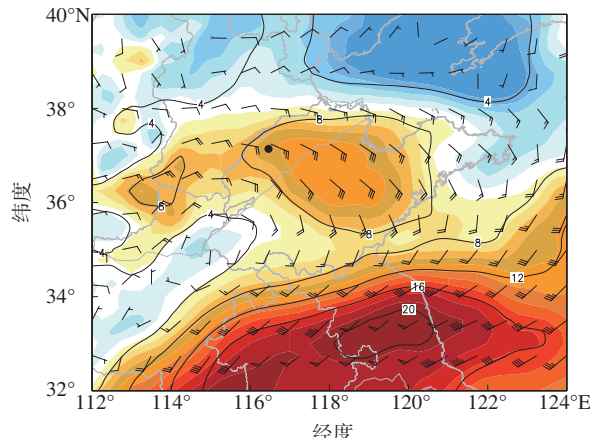
风速向北逐渐减小,鲁南地区为16~20 m·s<sup>-1</sup>,异常程度为3σ~4σ,鲁西北到鲁中地区为12~16 m·s<sup>-1</sup>,异常程度为1σ~3σ。风速梯度在鲁西北和鲁中一带最大,因此该处辐合最强,形成-8×10<sup>-3</sup> hPa·s<sup>-1</sup>的上升运动(图略)。由08:00—13:00的动态演变发现,低空急流是逐渐向北移动的,13:00山东达到最强。850 hPa(图6c)来自华南的西南风低空急流仅到达江苏北部,没有到达山东,山东中部为12 m·s<sup>-1</sup>的东南风低空急流,异常程度为2σ~4σ。由08:00—13:00的动态演变发现,东南风低空急流逐渐从鲁东南向鲁中一带推进的过程中存在脉动,12:00—13:00范围最大,向暴雪区输送来自黄海的水汽。



(a) 14日09:00—20:00济南平阴站风廓线雷达时序图



(b) 700 hPa全风速及其标准化距平



(c) 850 hPa全风速及其标准化距平



a中色阶—风速(单位: m·s<sup>-1</sup>), 风矢—风场(风速单位: m·s<sup>-1</sup>); b、c中等值线—全风速(单位: m·s<sup>-1</sup>), 色阶—标准化距平, 风矢—水平风(风速单位: m·s<sup>-1</sup>), 黑色圆点—平原站。

图6 “12·14”暴雪过程平阴站风廓线雷达时序和2023年12月14日13:00中低空全风速及其标准化距平  
Fig.6 Time series of wind profile at Pingyin station during the “12·14” snowstorm; wind speed and it's standardized anomaly at 700 hPa and 850 hPa at 13:00 BJT 14 December 2023

可见,“12·14”暴雪过程 700 hPa 低空急流范围广,从华南一直伸到山东,暴雪区风速为  $12 \sim 16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,异常程度为  $1\sigma \sim 3\sigma$ ;850 hPa 西南低空急流被阻断在江苏,依靠东南风急流向暴雪区输送来自黄海的水汽。

### 3.3 充沛的水汽条件

充沛的水汽是产生极端暴雪的必要条件,由图 7a 可以发现,2023 年 12 月 14 日 13:00,700 hPa 豫皖苏北部到鲁南地区比湿为  $6 \sim 7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,鲁西北和鲁中一带(暴雪区)比湿为  $4 \sim 5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。比湿绝对值自南向北逐渐减小,在西南风低空急流的作用下,比湿平流在山东中部达到最大,形成一个与比湿梯度平行的带状大值中心,中心最大值为  $22 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。随着低空急流逐渐向北推进,该大值中心随之北抬,13:00—15:00,在鲁西北—鲁中一带一直维持着  $6 \times 10^{-5} \sim 14 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  的比湿平流,向暴雪区源源不断地输送水汽。850 hPa(图 7b)与 700 hPa 相似,13:00,淮河流域一带比湿为超过  $8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  的高值区,鲁西北—鲁中一带比湿为  $3 \sim 4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,在东南风低空急流的作用下,在山东中部形成一条准东西向的带状比湿平流大值中心,中心最大值为  $12 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ,13:00—15:00,该大值中心一直维持在鲁中一带,为暴雪区提供了充足的水汽供应,鲁西北和鲁中地区的比湿维持  $3 \sim 4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  的时间长达 10 h 之久。一般情况下,700 hPa 或 850 hPa 比湿达到  $3 \sim 4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  就能造成山东暴雪<sup>[4,34]</sup>。“12·14”暴雪过程中,700 hPa 和 850 hPa 比湿分别达到  $4 \sim 5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $3 \sim 4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,表明水汽既充足又深厚,并且持续时间长,因此造成极端暴雪。2021 年 11 月 7 日 04:00,700 hPa(图 7c)  $4 \sim 6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  高比湿舌自南向北伸展,控制华中—山东中西部地区,比湿平流为  $2 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ,山东中西部地区比湿为  $4 \sim 5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与“12·14”暴雪过程相当。7 日 00:00—06:00,高湿舌一直控制着鲁西北和鲁中地区,之后随着西风槽东移,高湿舌缓慢东移,鲁西北和鲁中地区比湿超过  $4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  的时间分别持续到 11:00 和 15:00,持续时间均超过 10 h,该区域上空一直维持着充沛的水汽。04:00,850 hPa(图 7d)比湿与 700 hPa 分布特征相似,也是高湿舌自南向北伸展控制着安徽北部—山东中西部地区,鲁西北和鲁中地区比湿为  $4 \sim 7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,远远高于“12·14”暴雪过程,高湿舌与强偏东风共同作用下,在平原站附近形成一个中心最大值高达  $46 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  的高比湿平流中心。与

700 hPa 相似,该高湿舌从 7 日 00:00 开始控制鲁西北和鲁中地区,鲁西北和鲁中地区比湿超过  $4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  的时间均超过 10 h。“11·7”暴雪过程自南向北伸展的高湿舌形态比“12·14”暴雪过程准纬向分布的高湿区形态更有利于为暴雪区提供充足而持续的水汽来源。

综上所述,“12·14”和“11·7”极端暴雪过程中,异常偏强的低空急流将南方暖湿空气源源不断地输送到山东,使暴雪区的水汽充沛。比湿的形态特征虽然不同,但 700 hPa 比湿超过  $4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、850 hPa 比湿超过  $3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  的持续时间均长达 10 h 以上,为两次极端暴雪过程提供了充足的水汽,强降雪均发生在上游低空急流增强和维持阶段。两次暴雪过程 700 hPa 水汽的含量相当,“11·7”暴雪过程 850 hPa 的水汽含量和水汽平流远大于“12·14”暴雪过程,是“11·7”最大降雪量大于“12·14”的原因之一。

### 3.4 上升运动、降雪效率和雪水比

有了充足的水汽,需要足够的上升运动将水汽带到高空形成冰晶并降落到地面才能产生降雪。沿着冠县和平原做垂直剖面图(剖面位置见图 5b 绿色虚线)可见,2023 年 12 月 14 日 10:00(图 8a),850 hPa 是风向转换层,以下为东—东北风,以上为南—西南风。700 hPa 为强盛的西南风低空急流,风速自西南方向的  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  向东北方向逐渐减小到  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,在鲁西北辐合。整个对流层均为上升运动,最大上升运动中心( $-18 \times 10^{-3} \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ )位于冠县上空 500 hPa,该处为西南风( $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),下游为弱的西南风( $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),正处于风速辐合区。700 hPa 以上强盛的西南风为山东输送大量暖湿空气,由假相当位温的分布发现,西南方向 500 hPa 为 316 K 的低值中心,冠县上空 600 hPa 为大于 320 K 的相对高值区域,因此在冠县及其西南方向 600~500 hPa 为弱的不稳定层结(图 8a 中蓝色方框),垂直上升运动中心正处于不稳定层顶的前沿。12:00(图 8b),垂直上升运动中心( $-19 \times 10^{-3} \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ )移至平原上空 500 hPa。与冠县相似,平原上空 500 hPa 风速也处于  $20 \sim 18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  西南风风速的辐合区。假相当位温 320 K 的高值中心移至平原上空 600~500 hPa,其西南侧为 316 K 的低中心,在平原站及其西南方向 600~500 hPa 为弱的不稳定层结(图 8b 中蓝色方框),垂直上升运动中心也位于不稳定层顶的前沿。2 个测站上空的不稳定层均位于 500 hPa 附近,这是 700~500 hPa 强烈的西南风暖平流造成的,与文献[32-33,35]的研究结果一致,可以作为“雷打雪”现象的一个预报指标。

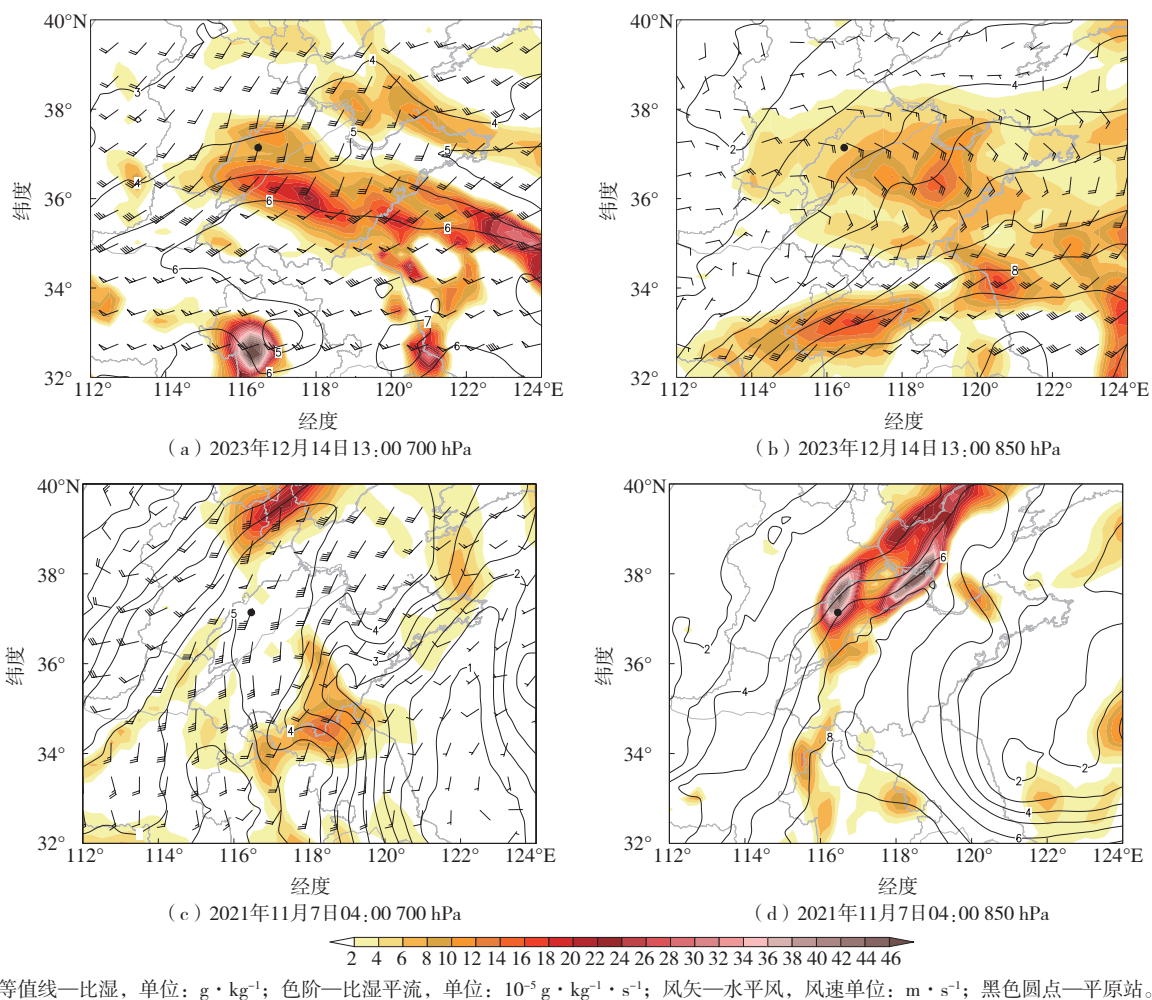


图7 700 hPa、850 hPa 比湿和比湿平流

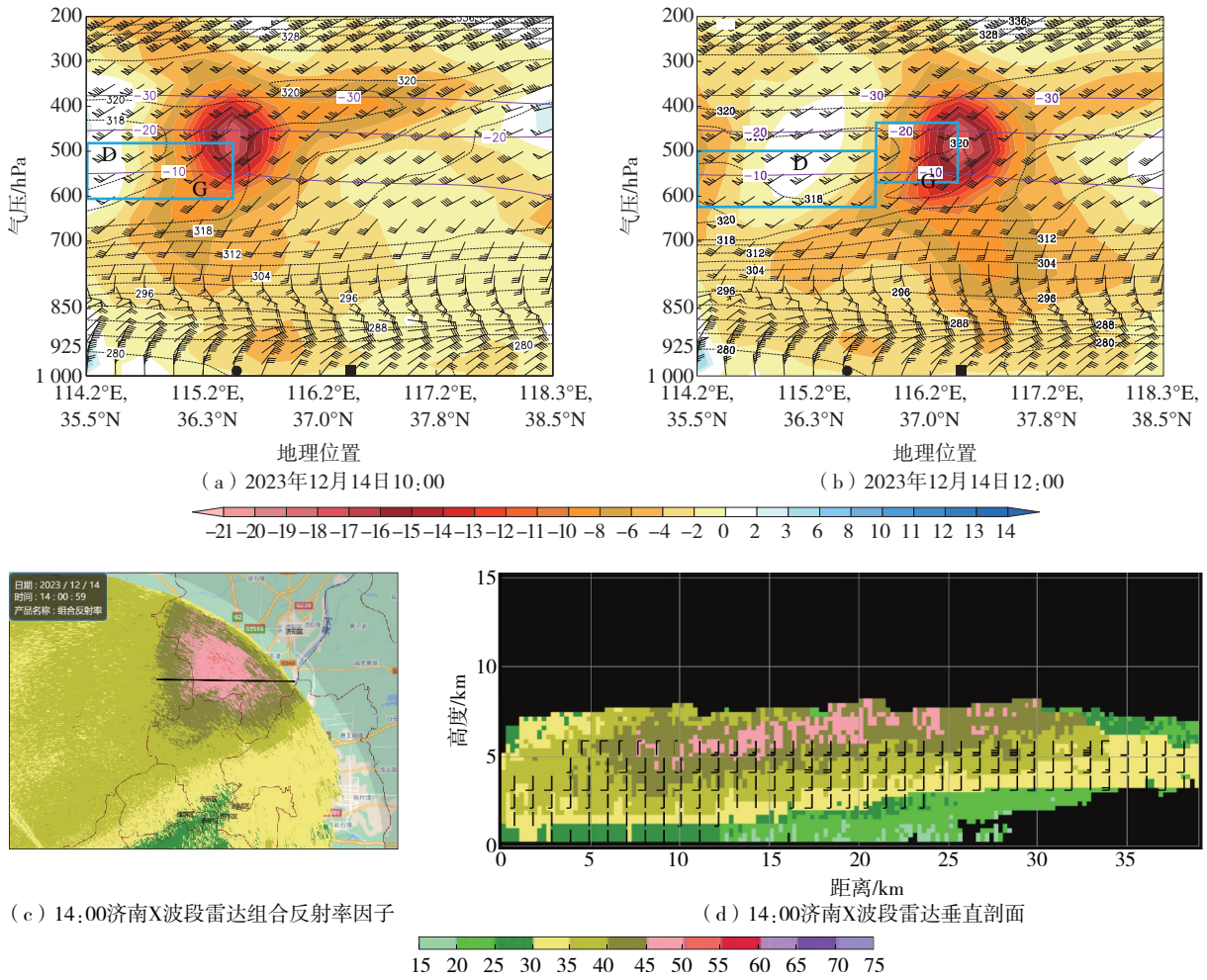
Fig.7 Specific humidity and specific humidity advection at 700 hPa and 850 hPa

由低层风场演变可见,10:00(图8a),850 hPa冠县为东风( $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),其西南方向为东—东北风,东北方向为东—东南风,且东南风的风速大于东北风的风速,说明冠县正处于低涡北侧东南风与东北风的切变线上,并且受到较强东南暖湿气流的控制,有利于水汽在当地辐合抬升。12:00(图8b),平原上空850 hPa东南风由10:00的 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增强到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,说明此时东南风低空急流正处于增强阶段。850 hPa增强的东南风低空急流与700 hPa以上强盛的西南风叠加在一起,给当地带来充沛持久的水汽,同时增大了抬升动力,使得垂直上升运动能够到达不稳定层并且继续上升。

由济南X波段雷达反射率因子(图8c)可见,对流发展旺盛,最大反射率因子为45~50 dBZ,垂直伸展高度高达7~8 km(图8d)。由雷达反演的垂直速度(图8d风矢)可以看出,上升运动剧烈,最大垂直上升速度 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 位于5~7 km高度。雷达反演的

上升速度强度明显大于再分析资料,但两种资料的最大上升速度所在高度接近,因此使用ERA5资料进行定性分析是可行的。

研究表明,最大降雪量发生在有利于树枝状冰晶增长的环境条件下,而树枝状冰晶主要发生在 $-18 \sim -12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过饱和环境中, $-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达到峰值,当云中温度低于 $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,云中的水物质主要表现为冰晶<sup>[29,34,36-37]</sup>。由2023年12月14日平原上空垂直运动的时间-高度剖面(图9a)可见,垂直上升运动发展旺盛,强上升运动集中在11:00—14:00,对流层整层为上升运动,最大上升运动中心( $-18 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )位于500 hPa,即 $-20 \sim -15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层附近,且300 hPa以下整层大气为饱和状态,云层温度有利于形成树枝状冰晶,不仅降雪效率高,而且雪水比高。同时,该站上空整层温度均小于 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,高空形成的固态粒子下落过程中不会出现融化,易形成较大的积雪深度。



a、b中黑色虚等值线—假相当位温（单位：K），蓝色方框—不稳定层，紫色实等值线—温度（单位：℃），色阶—垂直运动（负值上升，单位： $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ），风矢—水平风（风速单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ），黑色实心圆点和正方形—冠县和平原站位置；  
c、d中色阶—雷达反射率因子（单位：dBZ）；c中黑色实线—图d剖面位置；d中风矢—垂直速度（单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）。

图 8 沿冠县站和平原站气象要素垂直剖面 and 济南 X 波段雷达组合反射率因子及其垂直剖面

Fig.8 Vertical cross section of meteorological elements along Guanxian and Pingyuan stations; composite reflectivity and its vertical cross section from Jinan X-band radar

由 2021 年 11 月 7 日济南站上空垂直运动的时间-高度剖面 (图 9b) 可见, 强上升运动集中在 05:00—14:00, 对流层整层饱和, 08:00 之前强上升运动中心位于  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  层以下, 随着时间推移, 强上升运动中心逐渐上升, 09:00 位于  $-10 \sim -5 \text{ }^\circ\text{C}$  层附近, 11:00—13:00 最大上升运动中心 ( $-16 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 升至  $-20 \sim -10 \text{ }^\circ\text{C}$  层。可见, 济南站在初始降雪阶段, 由于强上升运动中心位于  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  以下, 易形成针状、柱状冰晶<sup>[26,29,37]</sup>, 后期随着上升运动高度不断上升, 冰晶逐渐转为树枝状。另外, 受偏南风暖平流影响, 7 日 02:00—11:00, 900~700 hPa 存在一个大于  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  的暖层, 中心最高温度为  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。虽然暖层厚度随时间逐渐变薄, 雪花经过暖层时会出现

融化, 到 900 hPa 以下时再次冻结, 雪密度增大, 雪水比降低, 因此 11:00 之前雪水比低, 积雪深度小。11:00 之后逆温层消失, 垂直运动高度上升, 此阶段形成的树枝状冰晶下落过程中没有融化, 雪水比高, 形成较厚的积雪。

综上所述, “12·14” 暴雪过程, 700 hPa 以上西南风低空急流强盛, 向暴雪区持续输送充沛的暖湿空气, 在对流层中层形成弱的对流不稳定层结, 最大上升运动中心位于不稳定层顶前沿 500 hPa 风速辐合区, 达到  $-20 \sim -10 \text{ }^\circ\text{C}$  层高度, 有利于形成树枝状冰晶, 降雪效率高。对流层整层温度低于  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , 雪花下落过程中没有融化, 雪水比高, 造成积雪深度大。“11·7” 暴雪过程, 降雪前期由于最大上升运动中心

高度低,形成柱状冰晶,经过逆温层时融化,雪水比低,降雪后期随着上升运动中心高度的升高,逆温层

消失,雪水比高,形成较厚的积雪深度,但24 h平均雪水比低于“12·14”暴雪过程。

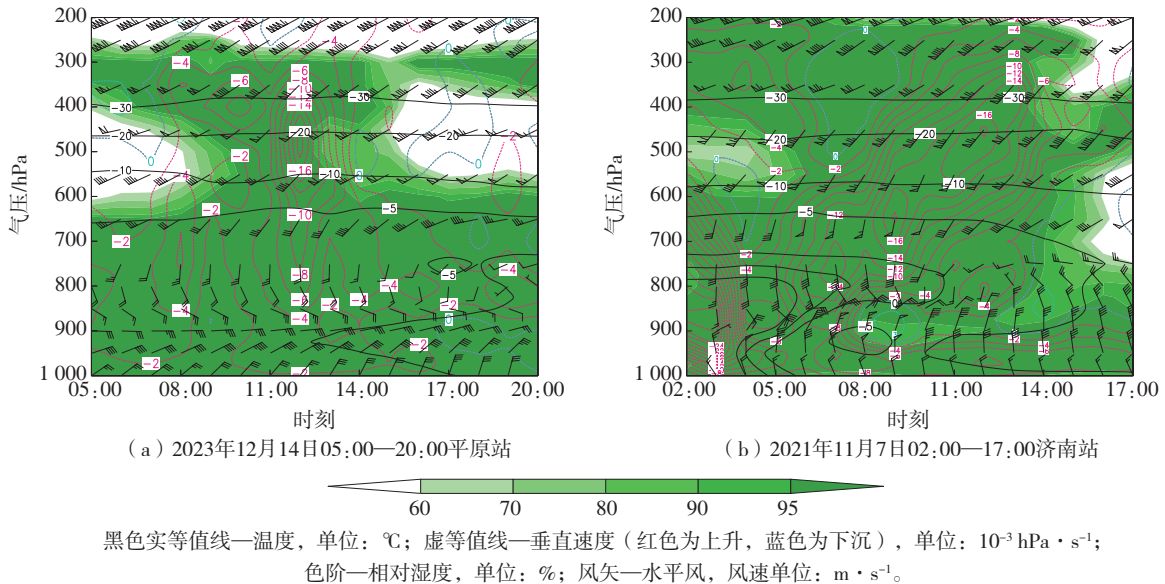


图9 平原站和济南站气象要素时间-高度剖面

Fig.9 Time-height cross section of meteorological elements at Pingyuan and Jinan stations

#### 4 结论与讨论

“12·14”暴雪过程具有降雪范围广、降雪强度大、降雪量和积雪深度极端性明显、雪水比大、降水相态复杂、伴有“雷打雪”现象等特征,被评为2023年山东十大天气气候事件之一。大雪花出现在纯雪阶段,而大雨滴出现在雨夹雪阶段,雨夹雪转纯雪阶段雨滴谱宽呈跳跃式增长,高浓度粒子的下落末速度呈下降趋势,雨滴谱宽和速度谱宽分别在纯雪和雨夹雪阶段最大。同一相态期间雨滴谱宽和速度谱宽相对稳定,雨强随粒子数浓度增大而增大。通过多源观测资料和 ERA5 资料,对此次暴雪的极端特征和成因进行了分析,结论如下:

(1) 大尺度的天气环流形势有利于产生暴雪,700 hPa西南风低空急流和850 hPa东南风低空急流共同作用为暴雪区提供了源源不断的水汽,暴雪区700 hPa和850 hPa低空急流异常程度分别为 $1\sigma \sim 3\sigma$ 和 $2\sigma \sim 4\sigma$ 。850 hPa切变线辐合、925 hPa以下东北风速辐合以及700 hPa西南低空急流辐合在鲁西北地区叠加,形成强烈而持久的上升运动。

(2) 地面降水强度不仅与低空急流的强度有关,而且与其厚度有关。当 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速区高度下降到3.0 km以下,降水强度随之增强。当3.0 km高度保持低空急流的强度时, $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速到达的高

度越低,雨强越大,降到1.2 km时雨强最大。当3.0 km以下风速减至 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下时,降水停止。

(3) 700 hPa比湿超过 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、850 hPa比湿超过 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的持续时间均长达10 h以上为“12·14”极端暴雪过程提供了充足的水汽。“11·7”暴雪过程850 hPa比湿和比湿平流远远高于“12·14”暴雪过程,是“11·7”最大累计降雪量大于“12·14”的原因之一。

(4) 强盛的暖湿平流在对流层中层形成弱的对流不稳定层结,在低层辐合抬升和暖湿平流共同作用下,垂直运动旺盛,最大上升速度位于不稳定层顶的前沿,处于 $-20 \sim -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层,有利于树枝状冰晶生长,降雪效率高。对流层整层温度低于 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,雪花下落过程中没有融化,雪水比高,积雪深度大。“11·7”暴雪过程初期最大上升运动中心高度低,形成更多柱状冰晶,降雪前期低层存在高于 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的暖层,雪花下落过程中出现融化,雪水比低,虽然降水量大于“12·14”,但积雪深度却小于“12·14”暴雪过程。

对于“12·14”暴雪过程,数值模式在天气形势、低空急流和水汽条件等方面预报效果较好,预报员根据数值模式预报基本能判断出是一次暴雪天气过程。但数值模式对于总降雪量的预报较实况偏小,对于暴雪的极端性预报仍显不足。不同数值模式对暴雪落区、总降雪量、相态转换、积雪深度等细节的预报差异较大,预报员在使用过程中仍需要总结经

验,对数值模式进行有效订正。比如菏泽一带转雪的时间比预计时间晚,造成暴雪空报,值得后序进行深入研究。暴雪强度、积雪深度、“雷打雪”等精细化预报是“12·14”暴雪过程的预报难点。

**致谢:**感谢山东省人民政府人工影响天气办公室王俊正高级工程师的指导和帮助!

### 参考文献:

- [1] 张桂莲,霍志丽,王学强.冷垫背景下冻雨和极端大暴雪成因机制分析[J].高原气象,2023,42(3):725-733.
- [2] 张芹,丁治英,杨成芳,等.山东一次历史极端降雪过程的诊断分析[J].高原气象,2015,34(4):1131-1138.
- [3] 胡顺起,曹张驰,陈滔.山东省南部一次极端特大暴雪过程诊断分析[J].高原气象,2017,36(4):984-992.
- [4] 杨成芳.山东暴雪[M].北京:气象出版社,2023.
- [5] 易笑园,张庆,陈宏,等.一次华北暴风雪过程中边界层中尺度扰动涡旋和水汽输送特征的分析[J].高原气象,2023,42(5):1311-1324.
- [6] 丁栋生,李树林.一次“雷打雪”天气过程的初步分析[J].气象,1993,19(10):52-53.
- [7] 何欢,赵碧云,崔恒立,等.基于风廓线雷达资料的“雷打雪”天气过程分析[J].高原山地气象研究,2014,34(2):13-16.
- [8] 郑丽娜,靳军.“2.28”山东罕见“雷打雪”现象形成机制分析[J].高原气象,2012,31(4):1151-1157.
- [9] 李博,王玮,刘飞,等.山东初冬一次极端降水和大风天气成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(4):30-37.
- [10] 李姝霞,袁小超,王国安,等.一次暴雪过程的高架雷暴环境条件及雷达特征[J].暴雨灾害,2023,42(5):541-553.
- [11] 刘晓岳,于海鹏,盛夏,等.半干旱区一次罕见“雷打雪”天气形成机制分析[J].气象,2020,46(12):1596-1607.
- [12] 王宁,杨学斌,杨成芳.2021年山东一次罕见区域性“雷打雪”天气成因分析[J].气象科技,2023,51(4):562-572.
- [13] 孙莎莎,孙艺,徐婷婷,等.2021年11月7日山东极端暴雪过程降水相态的多源观测特征分析[J].气象,2023,49(7):830-842.
- [14] 赵宇,蓝欣,杨成芳.一次江淮气旋极端雨雪过程的云系特征和成因分析[J].高原气象,2018,37(5):1325-1340.
- [15] 郑怡,杨成芳,郭俊建,等.一次罕见的山东半岛西部海效应暴雪过程的特征及机理研究[J].高原气象,2019,38(5):1017-1026.
- [16] 郑丽娜,李恬,孙骞,等.2021年2月黄河中下游两次暴雪的相态转换特征及成因[J].海洋气象学报,2022,42(3):48-56.
- [17] 谭政华,张爱忠,阎琦,等.2020年2月辽宁一次暴雪过程天气学成因与预报偏差分析[J].气象与环境学报,2023,39(4):1-8.
- [18] 王俊,王文青,王洪,等.山东北部一次夏末雹暴地面降水粒子谱特征[J].应用气象学报,2021,32(3):370-384.
- [19] 王俊,丛春华,王洪,等.台风温比亚(2018)登陆后雨滴谱演变特征研究[J].气象,2022,48(11):1449-1459.
- [20] 李慧,苏立娟,郑旭程,等.呼和浩特降雨和降雪过程粒子谱分布特征分析[J].气象,2021,47(1):71-81.
- [21] 程浩.多普勒天气雷达信息处理中的变分问题与风场反演研究[D].南京:南京信息工程大学,2022.
- [22] 肖安,许爱华.三小时负变压异常指数及对强对流天气的预报意义[J].气象学报,2018,76(1):78-91.
- [23] 张霞,杨慧,王新敏,等.“21·7”河南极端强降水特征及环流异常性分析[J].大气科学学报,2021,44(5):672-687.
- [24] 侯淑梅,朱晓清,史茜,等.冷涡背景下山东省“5·17”极端强对流天气环境条件分析[J].气象,2023,49(11):1328-1342.
- [25] 侯淑梅,唐巧玲,史茜,等.2020年5月山东强对流天气特点及成因[J].海洋气象学报,2023,43(4):47-61.
- [26] 崔锦,周晓珊,阎琦,等.降雪含水比研究进展[J].气象,2017,43(6):735-744.
- [27] 杨成芳,朱晓清.山东降雪含水比统计特征分析[J].海洋气象学报,2020,40(1):47-56.
- [28] 符娇兰,陈博宇,陈双,等.新增积雪深度客观预报技术研究及其应用[J].气象,2022,48(10):1230-1241.
- [29] 张亚妮,符娇兰,胡宁,等.华北中部平原地区一次降雪过程雪水比变化特征及成因分析[J].气象,2022,48(2):216-228.
- [30] 杨成芳,姜鹏,张少林,等.山东冬半年降水相态的温度特征统计分析[J].气象,2013,39(3):355-361.
- [31] 杨成芳,刘畅,郭俊建,等.山东相态逆转降雪天气的特征与预报[J].海洋气象学报,2017,37(1):73-83.
- [32] 郑丽娜,张子涵,夏金鼎.山东省“雷打雪”事件分型及其成因分析[J].气象,2019,45(8):1075-1084.
- [33] 周雪松,杨成芳,孙兴池.两次早春暴雪过程的对比分析[J].高原气象,2013,32(2):2446-2455.
- [34] 杨成芳,周雪松,李静,等.基于构成要素的一次切变线暴雪天气分析[J].高原气象,2015,34(5):1402-1413.
- [35] 王仁乔,宋清翠.“雷打雪”现象发生机制初探[J].气象,1990,16(3):45-48.
- [36] 翟亮,王林,郭金兰,等.北京一次极端雨雪天气异常诊断分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(4):9-13.
- [37] 刘奇奇,王健,高帆,等.山东深秋一次暴雪过程雪水比影响因子分析[J].海洋气象学报,2024,44(1):88-96.