

吴雪旭,杨成芳,王俊.江淮气旋暴雪和海效应暴雪个例的微物理特征对比[J].海洋气象学报,2024,44(2):77-89.

WU Xuexu, YANG Chengfang, WANG Jun. Comparative analysis on microphysical characteristics of Jianghuai cyclone snowstorm and sea-effect snowstorm cases [J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44 (2): 77-89. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240219001. (in Chinese)

## 江淮气旋暴雪和海效应暴雪个例的微物理特征对比

吴雪旭<sup>1,2</sup>,杨成芳<sup>1,2</sup>,王俊<sup>3</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.山东省人民政府人工影响天气办公室,山东 济南 250031)

**摘要** 利用雨滴谱等多源观测资料,对2023年12月山东江淮气旋暴雪和海效应暴雪的微物理特征进行了对比分析。结果表明:(1)相比于海效应暴雪,江淮气旋暴雪云系云顶高度较高,云顶亮温较低,对流强度较强。(2)江淮气旋暴雪的粒子数浓度高、粒子谱较窄、粒子体积较小、降雪强度较大;海效应暴雪的粒子数浓度低、粒子谱较宽、粒子体积较大、降雪强度较小。(3)江淮气旋暴雪的粒子下落末速度以单峰型为主,海效应暴雪则多为双峰型;江淮气旋暴雪的粒子下落末速度及其谱宽均大于海效应暴雪。(4)江淮气旋暴雪含有较多的霰粒、冰粒、雪花,海效应暴雪则以雪花及其聚合物为主。(5)两次暴雪的等效反射率因子( $Z_e$ )-降雪强度( $I_s$ )关系有较大差异。在降雪强度相同时,海效应暴雪的 $Z_e$ 更大。

**关键词** 江淮气旋暴雪;海效应暴雪;雨滴谱;微物理特征

中图分类号: P401;P458.3 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)02-0077-13

DOI:10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240219001

## Comparative analysis on microphysical characteristics of Jianghuai cyclone snowstorm and sea-effect snowstorm cases

WU Xuexu<sup>1,2</sup>, YANG Chengfang<sup>1,2</sup>, WANG Jun<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China; 3. Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031, China)

**Abstract** Using multi-source observation data including raindrop disdrometer data, the microphysical characteristics of the Jianghuai cyclone snowstorm (JHCS) and the sea-effect snowstorm (SES) that affected Shandong in December 2023 are analyzed. The results are shown below. (1) Compared to the SES, the cloud system of the JHCS has a higher cloud top height, a lower cloud top brightness temperature, and stronger convective intensity. (2) The JHCS has higher particle number concentration, narrower particle size distribution, smaller particle diameter, and larger snowfall intensity; the SES has lower particle number concentration, wider particle size distribution, larger particle diameter, and smaller snowfall intensity. (3) The distribution of particle terminal velocity of the JHCS is mainly unimodal, while that of SES is mostly bimodal; the particle terminal velocity and its width of the JHCS are larger than those of SES. (4) The JHCS contains more graupel, ice pellet, and snowflakes, while the

收稿日期:2024-02-19;修回日期:2024-04-01

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2022MD095, ZR2023MD025);山东省气象局大城市气象服务关键技术创新团队项目(SDCXTD2023-1)

第一作者简介:吴雪旭,男,硕士,助理工程师,主要从事中短期天气预报业务和技术研究,wuxuexu2116@yeah.net。

通信作者简介:杨成芳,女,博士,正高级工程师,主要从事天气预报业务及降雪研究,cf\_yang70@hotmail.com。

SES is mainly composed of snowflakes and their aggregations. (5) There is a significant difference in the  $Z_e-I_s$  (namely equivalent reflectivity factor-snowfall intensity) relationship between the two snowstorm cases. When snowfall intensity is the same, the  $Z_e$  of SES is larger.

**Keywords** Jianghuai cyclone snowstorm; sea-effect snowstorm; raindrop size distribution; microphysical characteristics

## 引言

暴雪是山东冬季的主要灾害性天气,可对农业生产、交通运输、能源供应等方面产生不利影响。根据天气形势和影响系统的差异,山东的暴雪天气可分为两大类:一类是受西南暖湿气流北上影响在全省大部分地区产生的暴雪天气,其影响系统包括江淮气旋、黄河气旋、回流形势等;另一类则是西北冷平流与渤海暖海面相互作用发生的海效应暴雪,主要发生在山东半岛的北部沿海地区<sup>[1-3]</sup>。两类暴雪均可对山东产生重大影响,也是冬季天气预报的重点和难点。

近年来,随着观测设备的升级换代和数值模式的快速发展,关于山东暴雪的研究工作取得了显著进步<sup>[2,4-8]</sup>。在涌现出大量研究成果的同时,也极大地提升了对暴雪的预报能力。杨成芳等<sup>[6]</sup>利用多种观测数据,对山东一次典型渤海海效应暴雪过程成因及动力结构演变特征进行分析,揭示了降雪的风场结构、雷达回波移向、降雪落区与风场的关系及降水相态等特征。赵宇等<sup>[7]</sup>分析了一次江淮气旋极端雨雪过程的云系特征和成因,明确了雨雪不同阶段的动力特征和水汽条件,并得出雨雪转换的风场特征。杨成芳等<sup>[8]</sup>对山东不同地区和不同类型的降雪含水比气候特征进行分析,发现山东半岛北部沿海地区降雪含水比明显高于全省大部地区,海效应暴雪则明显大于江淮气旋暴雪和回流暴雪。然而,目前关于山东暴雪的研究多集中在气候特征、环流形势、热力条件、降水相态演变、多尺度相互作用、积雪深度等方面,对暴雪的微物理特征研究<sup>[9]</sup>较少,更缺少对不同类型暴雪微物理特征的对比分析,限制了对暴雪天气的预报水平。

2023年12月,受强冷空气影响,山东出现大范围的寒潮雨雪天气。13—15日,受江淮气旋北上影响,全省范围内出现一次强降雪天气,其中鲁西北和鲁中地区出现大到暴雪局部大暴雪,降雪量为有气象记录以来山东12月历史之最<sup>[2]</sup>。此后,受冷空气的持续影响,15—22日,山东半岛地区出现持续性海效应暴雪,日降雪量和积雪深度均突破有气象记录以来海效

应暴雪的历史极值<sup>[2]</sup>。这两次暴雪天气降雪范围广、降雪强度大、积雪较深、极端性强、致灾性强,在社会上引起了广泛关注。本文使用常规观测、加密观测和特种观测资料,对这两次不同类型暴雪的微物理特征进行分析,以进一步加深对暴雪天气的理解和认识。

## 1 资料和方法

### 1.1 观测数据介绍

使用的观测资料包括地面观测资料、再分析资料、雨滴谱数据和FY-4A卫星观测资料。地面观测资料来源于气象大数据云平台·天擎系统,包括2023年12月13—22日山东123个国家级地面气象观测站的逐小时气温、相对湿度、风向风速、降水量和降水相态观测资料。再分析资料为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,时间分辨率为1 h,空间分辨率为 $0.25^\circ$ ,包括不同等压面的位势高度、相对湿度、风向风速等气象要素。雨滴谱数据来自于布设在山东国家级地面气象观测站的降水天气现象仪,时间分辨率为1 min,可测量的降水粒子直径范围为 $0\sim 26$  mm,下落末速度范围为 $0\sim 22.4$   $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。雨滴谱数据的处理方法详见1.2节。同时,使用风云卫星(FY-4A)的黑体亮温(black body temperature, TBB)和云顶高度(cloud top height, CTH)产品,二者的时间分辨率均为15 min,空间分辨率均为 $0.04^\circ$ 。如无特殊说明,文中涉及到的时间均为北京时。

### 1.2 雨滴谱数据处理方法

为了减小低信噪比数据带来的误差,对雨滴谱资料进行以下质量控制:(1)剔除雨滴谱数据中2个最小直径档(即直径小于 $0.25$  mm)的粒子,(2)剔除雨滴谱数据中下落末速度大于 $10$   $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的粒子。降水天气现象仪直接输出的雨滴谱数据是在采样时间间隔内直径和下落末速度位于采样区间中的粒子个数,直径和下落末速度均分为32个非等间距的测量通道。为便于计算特征量,将其转换为单

位体积、单位直径间隔内的粒子分布谱,具体计算方法<sup>[10-11]</sup>如式(1)所示:

$$N(D_j) = \sum_{i=1}^{32} \frac{n_{ij}}{S \cdot \Delta t \cdot V_i \cdot \Delta D_j} \quad (1)$$

式中: $N(D_j)$ 是第  $j$  个直径通道  $D_j$  至  $D_j + \Delta D_j$  之间的粒子数密度,单位为  $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ ;  $S$  是降水天气现象仪的取样面积,单位为  $\text{m}^2$ ,根据文献[9-10], $S$  订正后为  $180 \times (30 - D_j/2) \times 10^{-6}$ ;  $\Delta t$  是取样时间,单位为  $\text{s}$ ,取值为  $60 \text{ s}$ ;  $n_{ij}$  是第  $j$  个直径通道、第  $i$  个速度通道的粒子个数;  $V_i$  是第  $i$  个速度通道对应的粒子下落末速度,单位为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\Delta D_j$  和  $D_j$  分别是第  $j$  个直径通道的宽度和中心直径,单位为  $\text{mm}$ 。

单位体积、单位速度间隔内的粒子速度分布谱,可由式(2)<sup>[11]</sup>计算得出:

$$N(V_i) = \sum_{j=1}^{32} \frac{n_{ij}}{S \cdot \Delta t \cdot V_i \cdot \Delta V_i} \quad (2)$$

式中: $N(V_i)$ 为第  $i$  个速度通道  $V_i$  至  $V_i + \Delta V_i$  之间的粒子速度数密度,单位为  $\text{m}^{-3} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ ;  $\Delta V_i$  和  $V_i$  分别是第  $i$  个速度通道的宽度和中心速度,单位均为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其余变量的含义与式(1)相同。

根据粒子分布谱,粒子的有效直径( $D_{\text{eff}}$ )、降雪强度( $I_s$ )和等效雷达反射率因子( $Z_e$ )可分别由式(3)~(5)计算<sup>[10,12-16]</sup>得到:

$$D_{\text{eff}} = \frac{\int D^3 N(D) dD}{\int D^2 N(D) dD} \quad (3)$$

$$I_s = \frac{\pi}{6} \int \rho_s D^3 V N(D) dD \quad (4)$$

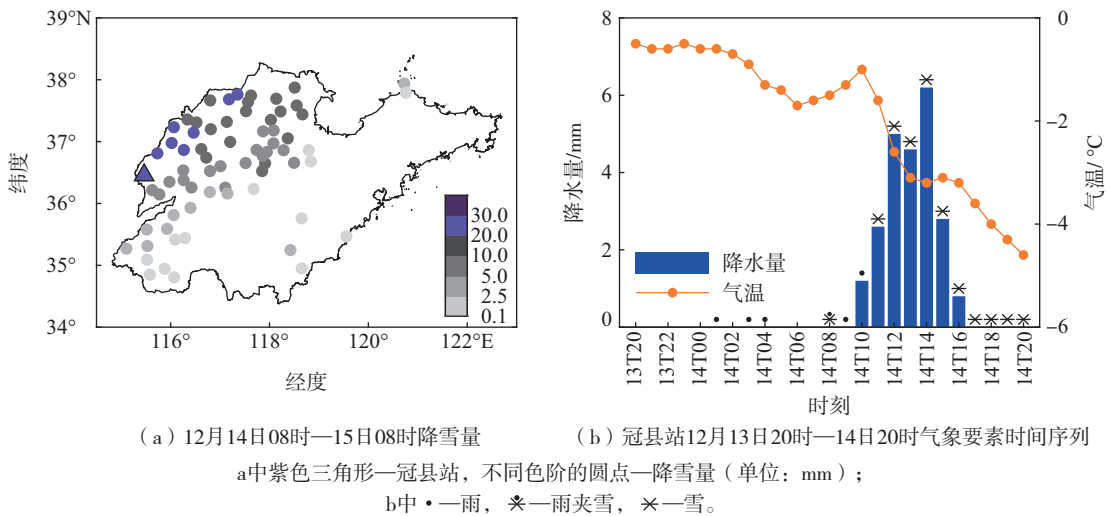
$$Z_e = \frac{|K_i|^2}{\rho_i^2 |K_w|^2} \int \rho_s^2 D^6 N(D) dD \quad (5)$$

式中: $D$ 为粒子直径,单位为  $\text{mm}$ ;  $N(D)$ 为直径  $D$  所对应的粒子数密度,单位为  $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ ;  $V$ 为下落末速度,单位为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $|K_i| = \frac{\epsilon_i - 1}{\epsilon_i + 2}$ ,  $\epsilon_i$  为冰的相对介电常数;  $|K_w| = \frac{\epsilon_w - 1}{\epsilon_w + 2}$ ,  $\epsilon_w$  为水的相对介电常数;  $\rho_i$  和  $\rho_s$  分别为冰和雪的密度,文中取  $\rho_i = 0.917 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。考虑到不同类型暴雪之间的微物理差异<sup>[13,15]</sup>,研究中海效应暴雪和江淮气旋暴雪的雪密度分别取  $\rho_s = 0.17 \text{ D}^{-1}$  和  $\rho_s = 0.39 \text{ D}^{-1.65}$ 。

## 2 两次暴雪过程天气形势概况

### 2.1 12月14日江淮气旋暴雪

2023年12月13日06时—15日08时,受江淮气旋影响,山东自西向东出现雨雪天气,其中鲁西北和鲁中地区出现大到暴雪、局部大暴雪(图1a)。以冠县站( $115^\circ 27' 48'' \text{E}$ ,  $36^\circ 27' 26'' \text{N}$ )为代表,分析此次江淮气旋暴雪的微物理特征。结合天气形势和雷达资料分析可知,14日冠县站的系统性降水由08时开始,11时后为降雪,至18时降雪结束,累计降雪量为  $22.0 \text{ mm}$ ;最大小时降雪量为  $6.2 \text{ mm}$ ,出现在14时(图1b)。



(a) 12月14日08时—15日08时降雪量 (b) 冠县站12月13日20时—14日20时气象要素时间序列  
a中紫色三角形—冠县站,不同色阶的圆点—降雪量(单位: mm);  
b中·—雨, \*—雨夹雪, ×—雪。

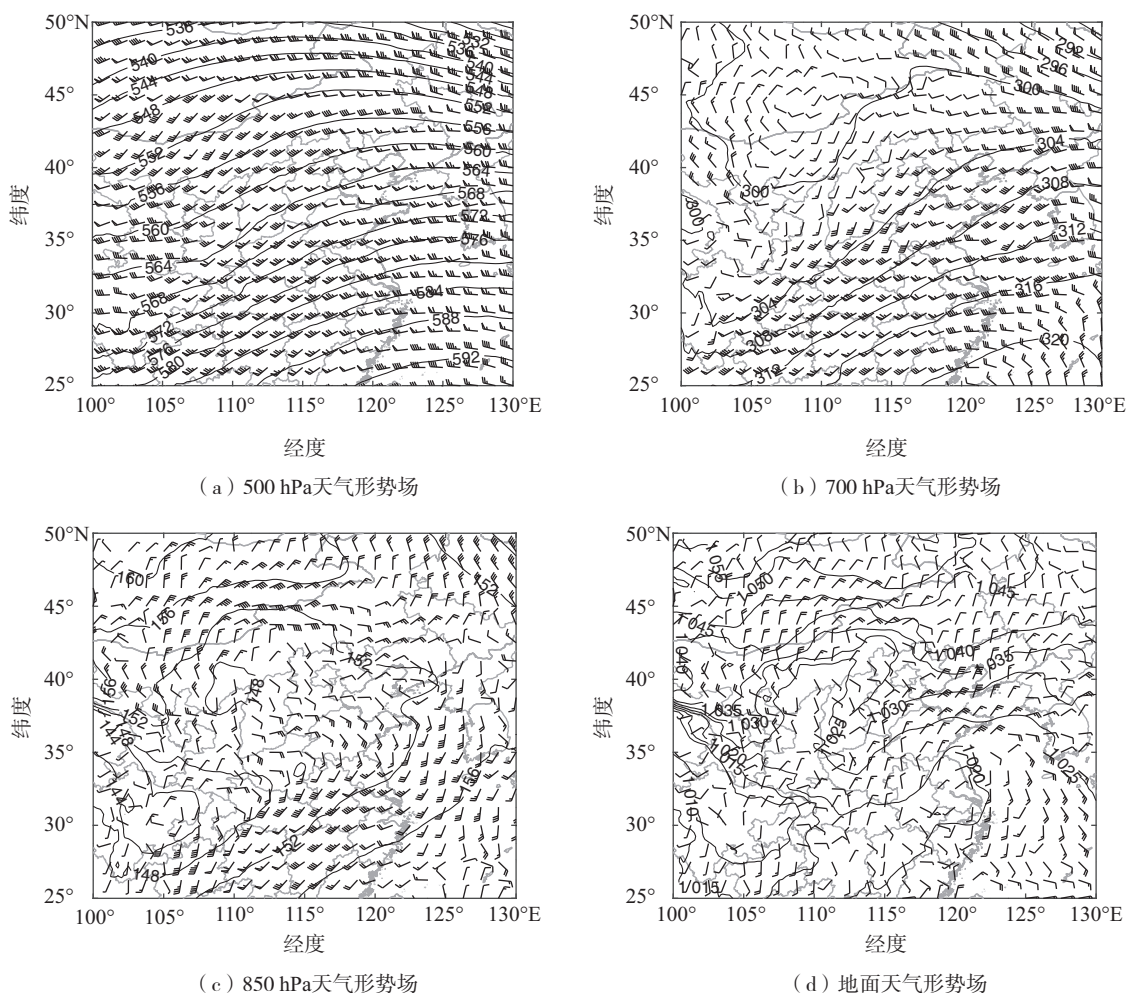
图1 江淮气旋暴雪的降雪量分布和冠县站气象要素的时间序列  
Fig.1 Distribution of snowfall during the Jianghuai cyclone snowstorm and time series of meteorological elements at Guanxian station

由12月14日08时不同高度层的环流形势(图2)可见:山东位于500 hPa短波槽前(图2a),700 hPa中支槽超前于南支槽,存在强西南低空急流,急流轴上云贵到江淮地区的风速为 $16\sim 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,将来自孟加拉湾的水汽输送至山东地区(图2b);850 hPa上西南地区有低涡存在,其北侧的暖切变线位于鲁南地区(图2c);地图上,08时山东受东北风控制(图2d),11时江淮气旋在江苏中部形成并逐渐东移至黄海。西南低空急流为暴雪提供了充分水汽条件,高空槽和切变线有利于抬升运动,在鲁西北和鲁中地区,暖湿气流叠加在低层冷空气上,形成“上暖湿下干冷”的垂直结构,有利于形成暴雪。德州、聊城

和济南还出现了“雷打雪”现象。

## 2.2 12月21日海效应暴雪

2023年12月19日10时—22日17时,受强冷空气影响,烟台和威海出现持续性海效应暴雪天气。其中文登站20日20时—21日20时降雪量达33.7 mm(图3a),突破有气象记录以来海效应暴雪日降雪量的历史极值<sup>[2]</sup>。以文登站( $122^{\circ}3'38''\text{E}$ ,  $37^{\circ}12'25''\text{N}$ )为代表,分析此次海效应暴雪的微物理特征。结合天气形势和雷达资料分析可知,文登的降雪过程于20日21时开始,至21日14时结束,过程降雪量为33.1 mm;最大小时降雪量为4.3 mm,出现在21日01时(图3b)。



a、b、c中等值线一位势高度,单位: dagpm; d中等值线—海平面气压,单位: hPa; 风矢—风场,风速单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

图2 2023年12月14日08时不同高度层的天气形势

Fig.2 Synoptic charts of different levels at 08:00 BJT 14 December 2023

此次暴雪受强冷空气和渤海暖海面共同影响产生,20日20时渤海和山东半岛处在500 hPa横槽前部(图4a),700 hPa以下均受西北气流控制

(图4b),850 hPa上为西北冷平流(图4c),山东半岛东部850 hPa温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。地面气压场上,山东半岛北部沿海存在北风和西北风的切变

(图 4d)。这是山东半岛地区 12 月典型的海效应暴雪天气形势<sup>[2-3]</sup>,强冷空气流经渤海暖海面导致较大的海气温差,暖海面向上输送感热,形成

“上干冷下暖湿”的大气层结不稳定,低层切变线和地形共同作用产生较强的上升运动,导致海效应暴雪的发生。

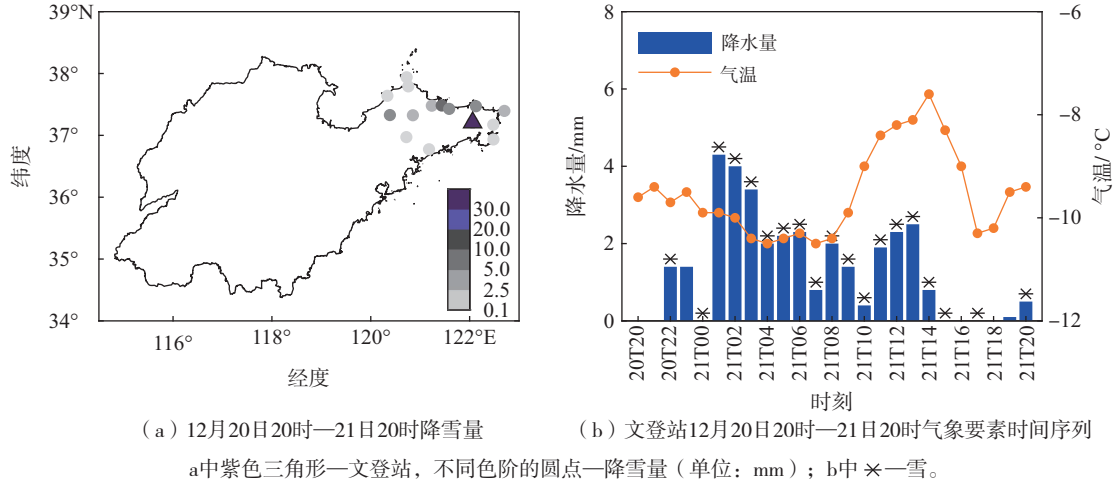
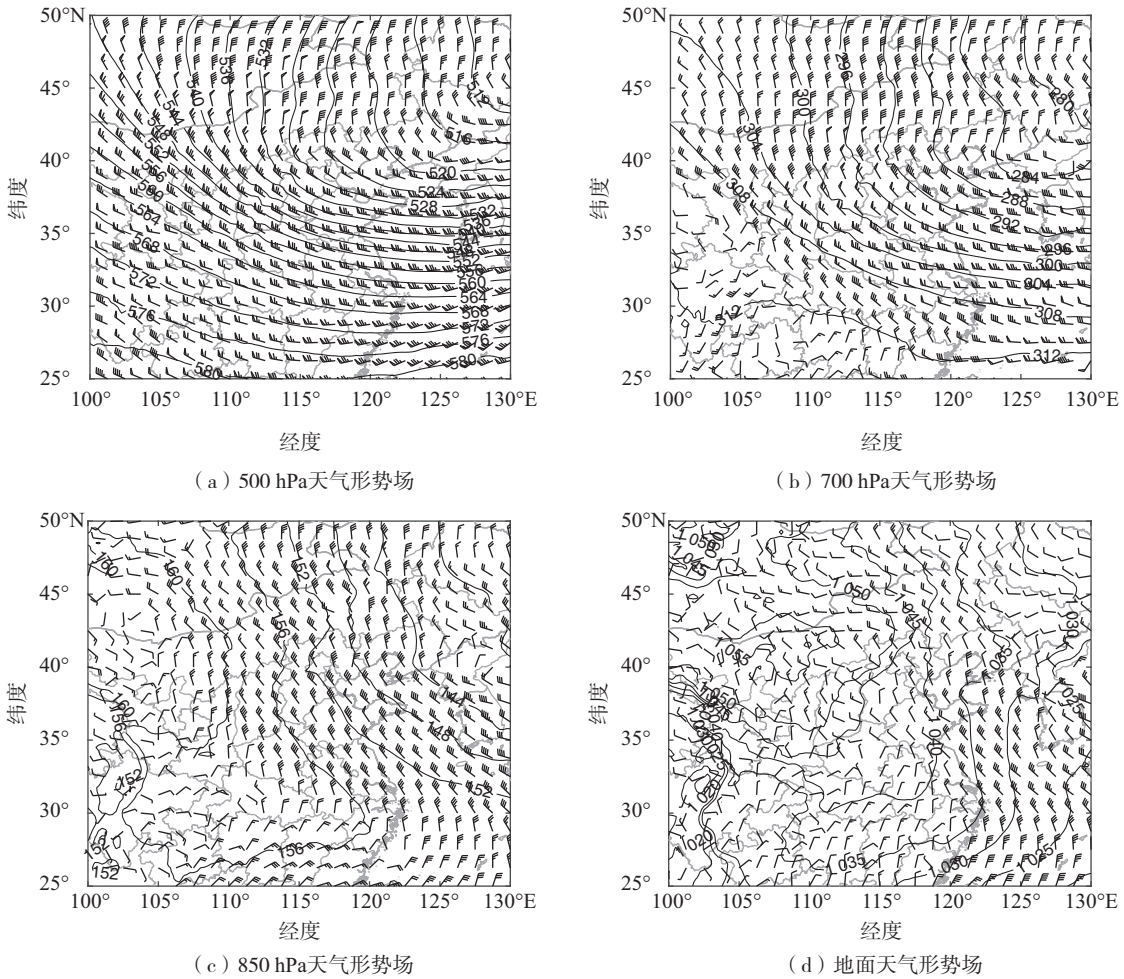


图 3 海效应暴雪的降雪量分布和文登站气象要素的时间序列

Fig.3 Distribution of snowfall during the sea-effect snowstorm and time series of meteorological elements at Wendeng station



a、b、c中等值线—位势高度,单位: dagpm; d中等值线—海平面气压,单位: hPa; 风矢—风场,风速单位:  $m \cdot s^{-1}$ 。

图 4 2023 年 12 月 20 日 20 时不同高度层的天气形势

Fig.4 Synoptic charts of different levels at 20:00 BJT 20 December 2023

由上述分析可知,12月14日江淮气旋暴雪和21日海效应暴雪的环流背景有明显差异。江淮气旋暴雪的影响系统是大尺度降水系统,发生在低层为东北风、中上层为西南风的形势下,形成“上暖湿下干冷”的大气垂直结构,中低层水汽条件好,系统发展旺盛且比较深厚,降雪在全省分布范围广。海效应暴雪由发展较浅薄的中尺度系统引发,整层均为西北风,水汽来源于渤海暖海面,大气垂直结构为“上干冷下暖湿”的不稳定层结,属于浅对流系统,影响范围小,降雪仅出现在山东半岛北部沿海地区。

### 2.3 降雪云系宏观特征分析

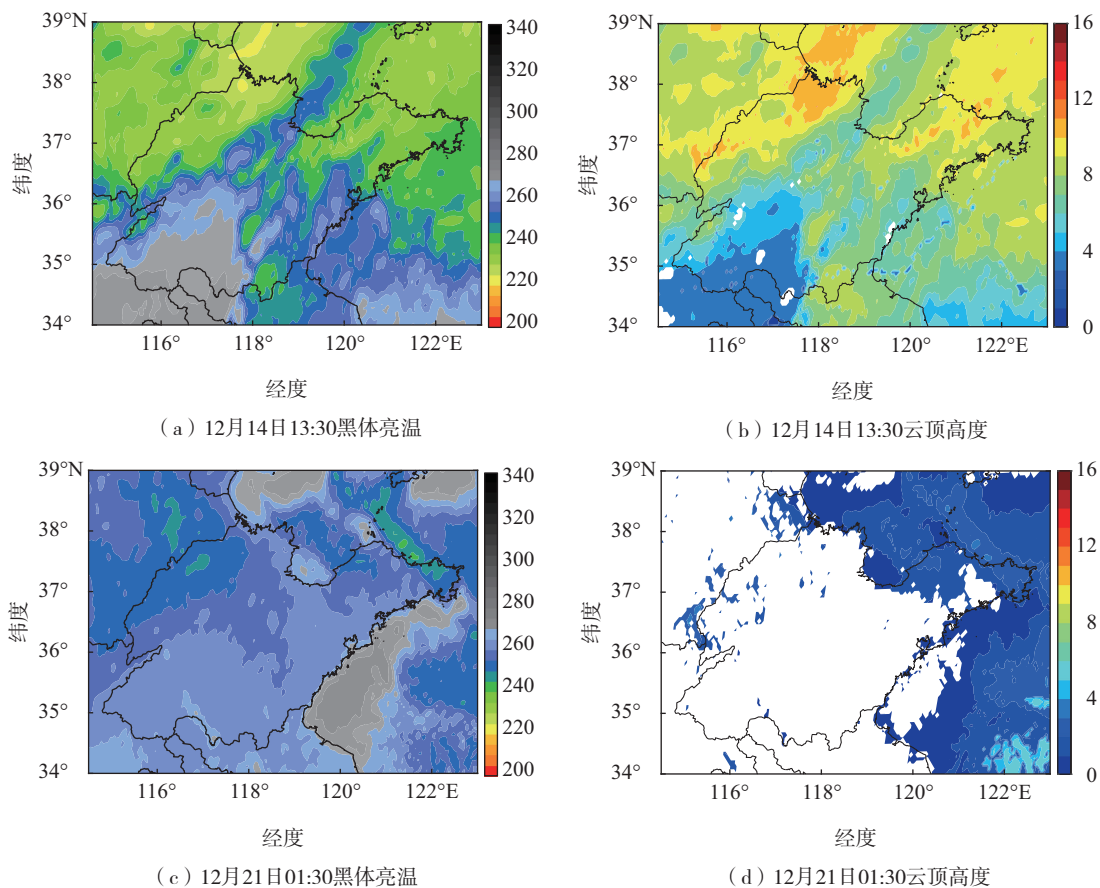
卫星观测可获取较大空间范围内云系的宏观特征<sup>[7]</sup>。为了更好地对两次暴雪的特征进行分析,选取两次暴雪过程中降雪较强的2个时次(分别为14日13:30和21日01:30),对比FY-4A卫星观测的CTH和TBB。由图5a、b可知,江淮气旋暴雪云系空间尺度大,广泛分布在河北中南部到山东大部地区,TBB多低于245 K,CTH多高于5 km;其中冠

县附近的TBB为235~240 K,CTH为7~10 km。相比之下,由图5c、d可知,海效应暴雪云系空间尺度较小,表现为分布在渤海到山东半岛一线的窄云带,TBB为245~260 K,CTH大多低于3 km;文登附近的TBB约为250 K,CTH为1~2 km。上述结果表明,海效应暴雪云系的CTH明显低于江淮气旋暴雪云系,TBB则相对较高,对流发展较浅。

## 3 暴雪微物理特征对比分析

### 3.1 时间序列分析

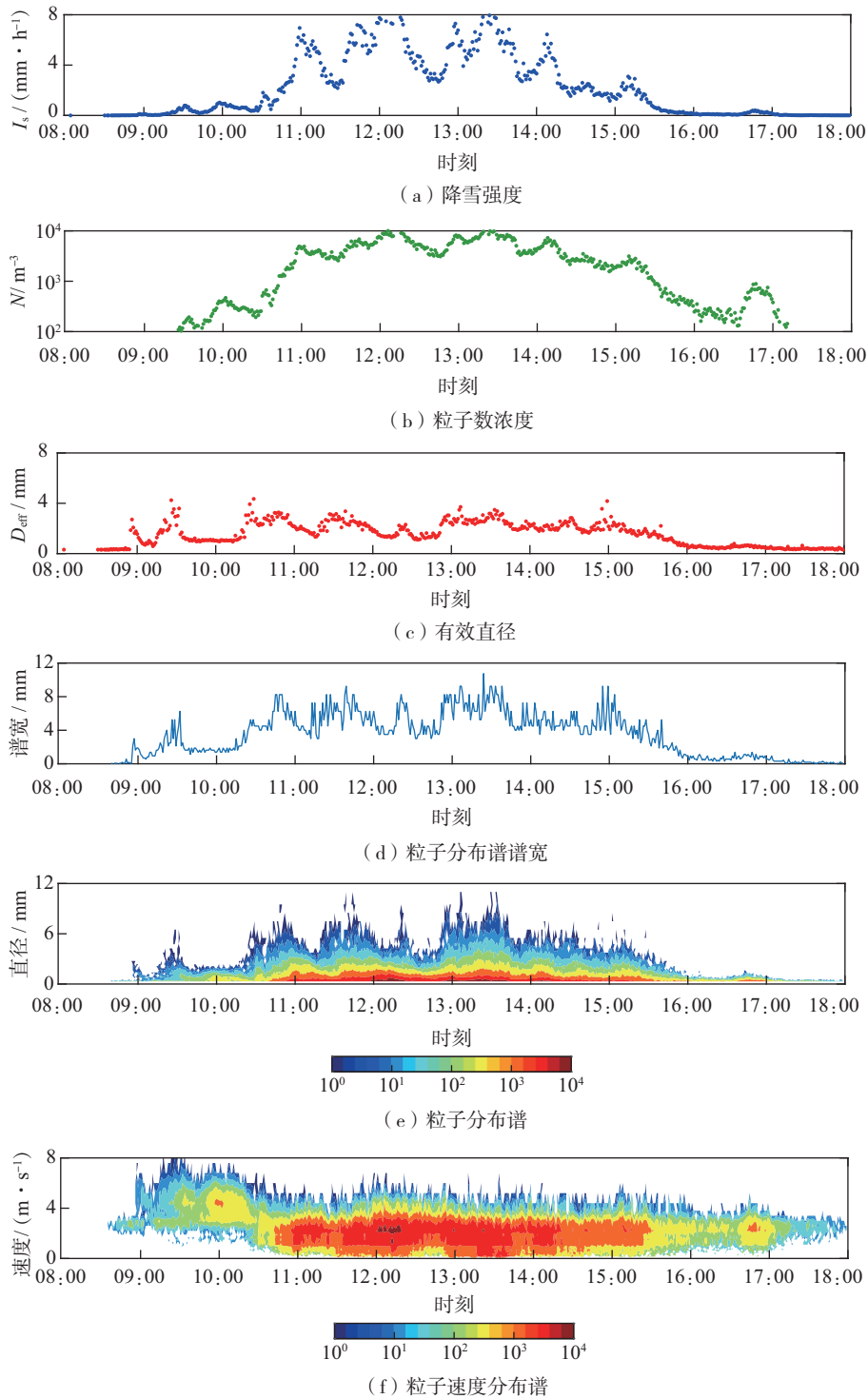
降雪强度( $I_s$ )、降雪粒子有效直径( $D_{\text{eff}}$ )、粒子数浓度( $N$ )、粒子分布谱、粒子下落末速度分布及其宽度是降雪微物理特征分析中常用的参数<sup>[9,12-14,17-18]</sup>。图6为冠县站降水过程中微物理参数的时间序列,结合天气形势、地面观测资料和雨滴谱数据,将整个系统性降水过程分为3个阶段:雨和雨夹雪阶段(08:30—10:40)、降雪成熟阶段(10:41—14:30)和降雪减弱阶段(14:31—18:00)。



a、c中色阶—黑体亮温,单位:K; b、d中色阶—云顶高度,单位:km。

图5 FY-4A卫星观测的黑体亮温和云顶高度空间分布

Fig.5 Spatial distribution of TBB and CTH observed by FY-4A satellite



e中色阶—粒子数密度, 单位:  $m^{-3} \cdot mm^{-1}$ ; f中色阶—粒子速度数密度, 单位:  $m^{-3} \cdot (m \cdot s^{-1})^{-1}$ 。

图 6 冠县站降水过程中微物理量的时间序列

Fig.6 Time series of microphysical quantities during the precipitation process at Guanxian station

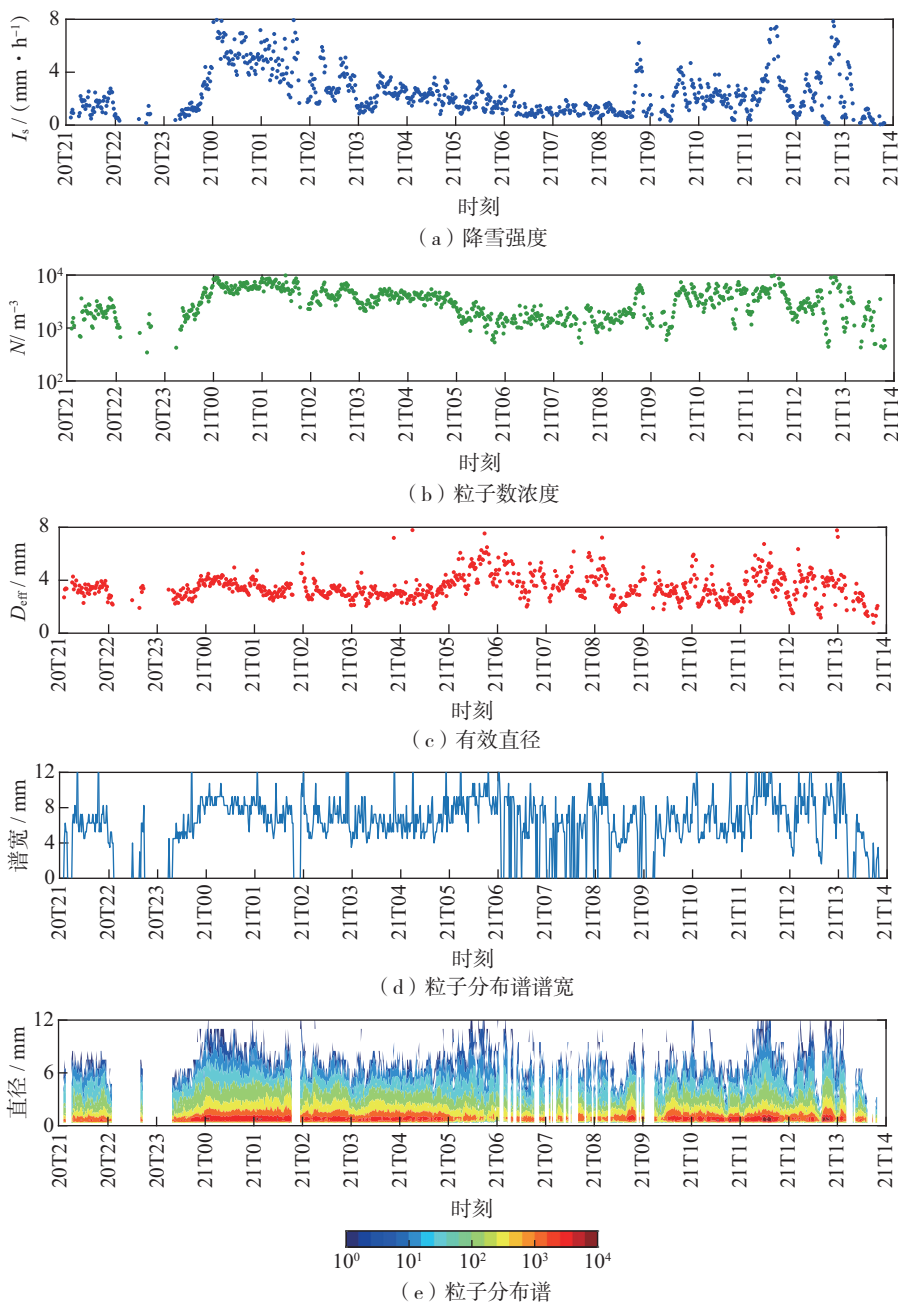
在雨和雨夹雪阶段,  $N$ 、 $D_{eff}$  和粒子分布谱谱宽均相对较小, 粒子的下落末速度较大, 为  $3 \sim 8 m \cdot s^{-1}$ 。在 10:40 附近,  $N$  和  $D_{eff}$  增大, 粒子谱拓宽, 而下落末速度明显减小, 降水相态转为降雪。进

入降雪成熟阶段, 粒子分布谱谱宽由 4 mm 逐渐增大到 8 mm,  $N$  增大至  $10^3 m^{-3}$  以上; 相比之下, 粒子的下落末速度显著减小, 范围为  $0.5 \sim 4.0 m \cdot s^{-1}$ 。11:30 前后,  $N$  达到  $10^4$  量级的峰值, 此时谱宽为  $7 \sim$

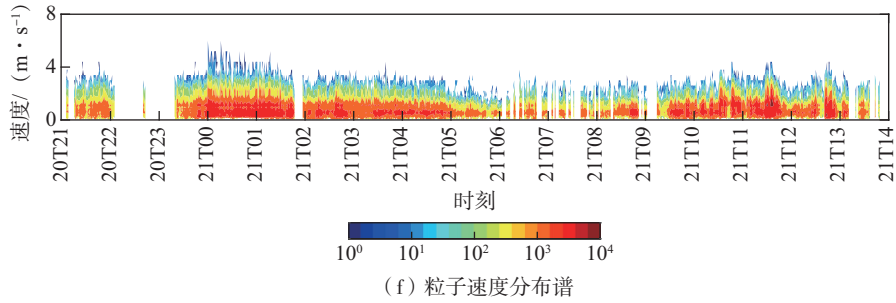
9 mm。13:30 前后,  $I_s$  达到  $8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的峰值,  $N$  约为  $10^4 \text{ m}^{-3}$ , 谱宽为 8~10 mm。在降雪减弱阶段,  $I_s$  小于  $3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 谱宽和  $N$  均逐渐减小, 而下落末速度变化不大。总体来看, 降雪成熟和减弱阶段, 粒子分布谱以单峰型为主, 谱宽多小于 6.5 mm; 粒子速度分布谱多为单峰型, 谱宽多为  $4.5 \sim 5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图7为文登站降雪过程中微物理参数的时间序列, 结合天气形势和雨滴谱数据, 将此次海效应降雪过程分为降雪开始阶段(20日 21:00—21日 00:00)、降雪成熟阶段(21日 00:01—13:00)和降雪减弱阶段(21日 13:01—14:00)。在降雪开始阶段,  $I_s$

和  $N$  均逐渐增大, 粒子分布谱谱宽从 8 mm 逐渐增至 11 mm, 下落末速度亦逐渐增大。在降雪成熟阶段, 00:01—03:00,  $I_s$  达到  $6 \sim 8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $N$  为  $10^4$  量级, 谱宽为 8~10 mm; 03:01—10:00,  $I_s$  和  $N$  相对较小, 谱宽和下落速度变化不大; 10:01—13:00,  $I_s$  为  $5 \sim 7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $N$  达到  $10^4$  量级, 谱宽为 8~12 mm。降雪减弱阶段,  $I_s$  小于  $4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 谱宽和  $N$  均减小, 而下落末速度变化不大。整个降雪过程中, 粒子分布谱以单峰型为主, 谱宽多大于 6.5 mm, 粒子下落末速度为  $0.5 \sim 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 粒子速度分布谱多为双峰型, 峰值速度分别在  $0.75, 1.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  附近。







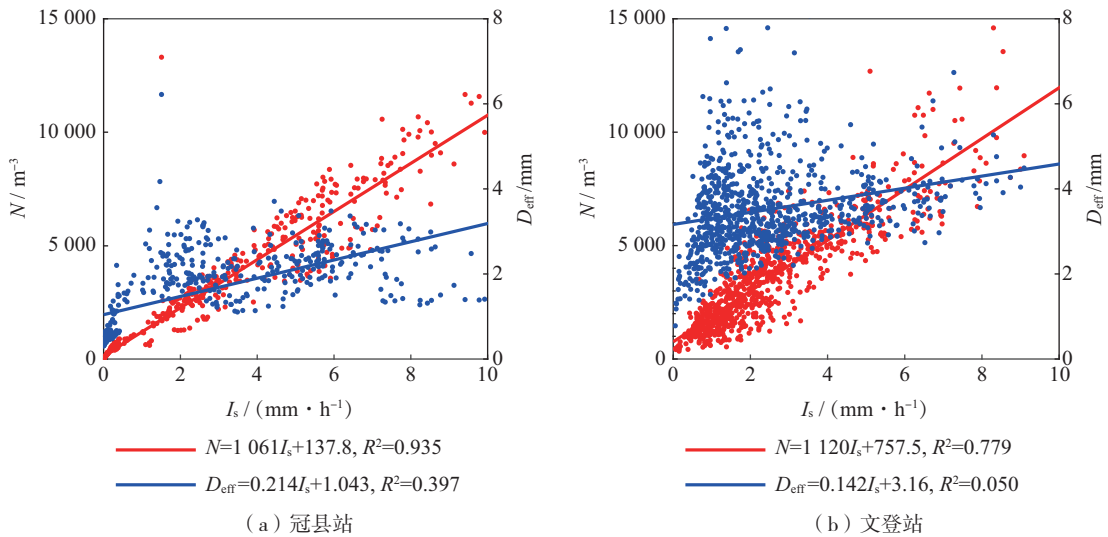
e 中色阶—粒子数密度, 单位:  $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ ; f 中色阶—粒子速度数密度, 单位:  $\text{m}^{-3} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ 。

图 7 文登站降雪过程中微物理量的时间序列

Fig.7 Time series of microphysical quantities during the snowfall process at Wendeng station

由图 6 和图 7 可知,两次降雪过程中  $N$  的峰谷位置与  $I_s$  呈现大致相似的变化趋势,而  $D_{\text{eff}}$  的峰谷位置则与  $I_s$  不完全对应。通过对  $I_s$ 、 $N$ 、 $D_{\text{eff}}$  进行线性拟

合(图 8),发现两次暴雪过程的  $N$  与  $I_s$  存在较好的正相关关系,且相关性较高, $D_{\text{eff}}$  与  $I_s$  虽然也存在一定的相关性,但相关性较低。



红色和蓝色散点— $N-I_s$  和  $D_{\text{eff}}-I_s$  的实测值; 红色和蓝色直线— $N-I_s$  和  $D_{\text{eff}}-I_s$  的拟合结果。

图 8 两次暴雪的  $N-I_s$  和  $D_{\text{eff}}-I_s$  分布及拟合结果

Fig.8 Distributions and fitting results of  $N-I_s$  and  $D_{\text{eff}}-I_s$  of two snowstorm cases

表 1 列出了两次暴雪过程中不同阶段微物理参数的对比,可以看出,对于两次暴雪,降雪成熟阶段的  $I_s$ 、 $N$ 、 $D_{\text{eff}}$  和谱宽均大于其他阶段。在降雪成熟阶段,海效应暴雪的  $D_{\text{eff}}$  和谱宽明显大于江淮气旋暴雪,而  $I_s$  和  $N$  则相对较小;在其他阶段,海效应暴雪的  $N$ 、 $I_s$  则大于江淮气旋暴雪。

由上述分析可知,两次暴雪的降雪强度均与粒子数浓度有较高相关性,而与有效直径相关性较低;降雪强度增大时粒子分布谱拓宽,降雪强度减小时则相反。二者的差异在于,江淮气旋暴雪的粒子数

浓度高、粒子谱较窄、粒子体积较小、降雪强度较大,具有大陆谱特征;海效应暴雪的粒子数浓度低、粒子谱较宽、粒子体积较大、降雪强度较小,具有海洋谱特征。此外,江淮气旋暴雪的下落末速度及其分布谱宽度均大于海效应暴雪,海效应暴雪的粒子速度分布谱以双峰型为主,江淮气旋暴雪则多为单峰型。

### 3.2 降水粒子分布谱分析

粒子分布谱可描述不同尺度粒子的浓度分布,进而可揭示不同类型降水的差异<sup>[12,17,19]</sup>。对整个降雪过程进行平均,得到两次暴雪的平均粒子分布

谱(图9a)。冠县站平均粒子分布谱为单峰型,峰值直径为0.312 mm,峰值浓度为 $6.45 \times 10^3 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ ;文登站的平均粒子分布谱为单峰型,峰值直径为0.687 mm,峰值浓度为 $4.12 \times 10^3 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。相比于

文登站,冠县站粒子分布谱中直径小于1 mm的粒子数较多,而直径大于3 mm的粒子数浓度则相对较少,即冠县站降雪粒子的体积小于文登站,小粒子占比更高。

表1 两次暴雪不同阶段微物理参数的平均值对比

Table 1 Mean values of microphysical quantities of two snowstorm cases at different stages

暴雪过程	降雪阶段	降雪强度/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	粒子数浓度 / $\text{m}^{-3}$	有效直径 / $\text{mm}$	粒子分布谱 谱宽/ $\text{mm}$
江淮气旋暴雪	雨和雨夹雪阶段	—	175	1.41	2.17
	降雪成熟阶段	4.89	5 314	2.22	5.94
	降雪减弱阶段	0.63	823	1.03	2.21
	降雪过程平均	2.86	3 172	1.65	4.16
海效应暴雪	降雪开始阶段	1.57	2 235	3.40	6.49
	降雪成熟阶段	2.65	3 778	3.56	7.59
	降雪减弱阶段	1.26	1 937	3.01	6.09
	降雪过程平均	2.46	3 517	3.51	7.38

根据3.1节划分的不同降水阶段,讨论了不同阶段粒子分布谱的特征。由图9b、c可知,对于冠县站和文登站,不同降水阶段的粒子分布谱谱型均为单峰型,峰值直径也保持不变,分别为0.312 mm和0.687 mm。在降雪成熟阶段,粒子谱的峰值浓度和宽度大于其他阶段,且所有直径范围内的粒子数浓度也相对较高。相比之下,冠县站降雪成熟阶段的

粒子分布谱峰值浓度高于文登站,而大于5 mm的粒子数浓度则明显低于文登站。

上述结果表明,两次暴雪的粒子分布谱均为单峰型,降雪成熟阶段不同尺度的粒子数量均大于其他阶段。相比于海效应暴雪,江淮气旋暴雪的粒子分布谱峰值直径较小、峰值浓度较大,小粒子数量较多,但大粒子数量较少。

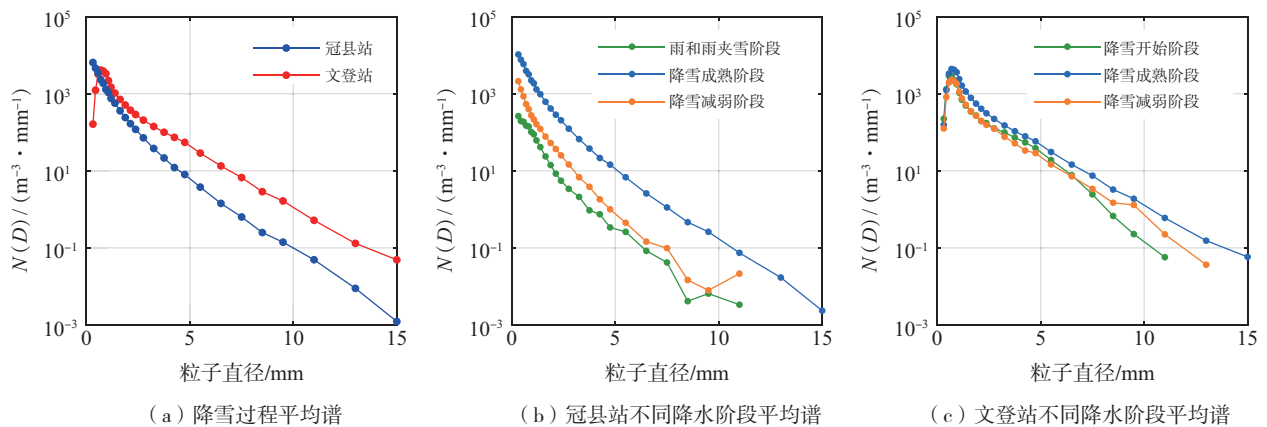


图9 不同条件下的平均粒子分布谱

Fig.9 Mean particle size distribution under different conditions

### 3.3 降水粒子直径和下落末速度关系分析

降水粒子直径( $D$ )和下落末速度( $V$ )的关系是雷达反演降水粒子谱的基础,同时也是数值模式中微物理参数化方案的重要组成部分。图10为整个降雪过程中冠县站和文登站降雪粒子的 $V$ - $D$ 关系,并列出了一些降水粒子的 $V$ - $D$ 经验关系<sup>[14-15,17,20]</sup>。

可将观测得到的 $V$ - $D$ 分布与理论曲线进行对比,以便分析降雪过程中粒子的形态分布。

整个降雪过程中,冠县站降雪粒子直径主要集中在0.5~8.0 mm范围内,粒子直径最大可达12.0 mm,对应的下落末速度为 $2.5 \sim 3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;降雪粒子的下落末速度主要集中在 $0 \sim 6.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,

下落末速度最大为  $7.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 对应的直径为  $3.0\sim 4.0 \text{ mm}$ (图 10a)。图 10a 表明, 部分粒子的  $V$ - $D$  关系介于雪花和霰粒之间, 相比之下更靠近霰粒, 这表示降雪过程中有多种粒子共存, 霰粒的占比高于雪花。此外, 还有部分粒子的  $V$ - $D$  关系接近雨滴。结合地面观测可知, 这些粒子实际为冰粒, 体积较小但下落速度较大<sup>[21]</sup>。

整个降雪过程中, 文登站的降雪粒子直径主要

集中在  $0.5\sim 11.0 \text{ mm}$  范围内, 最大粒子直径约为  $17.0 \text{ mm}$ , 对应的下落末速度为  $1.5\sim 2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 降雪粒子的下落末速度主要集中在  $0\sim 4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  范围内, 最大下落末速度为  $6.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 对应有多个直径峰值(图 10b)。通过分析图 10b 可知, 部分粒子的  $V$ - $D$  关系接近雪花, 也有一部分粒子的  $V$ - $D$  关系介于雪花和霰粒之间, 但更接近雪花。这表明降雪过程中有多种粒子共存, 雪花占主导。

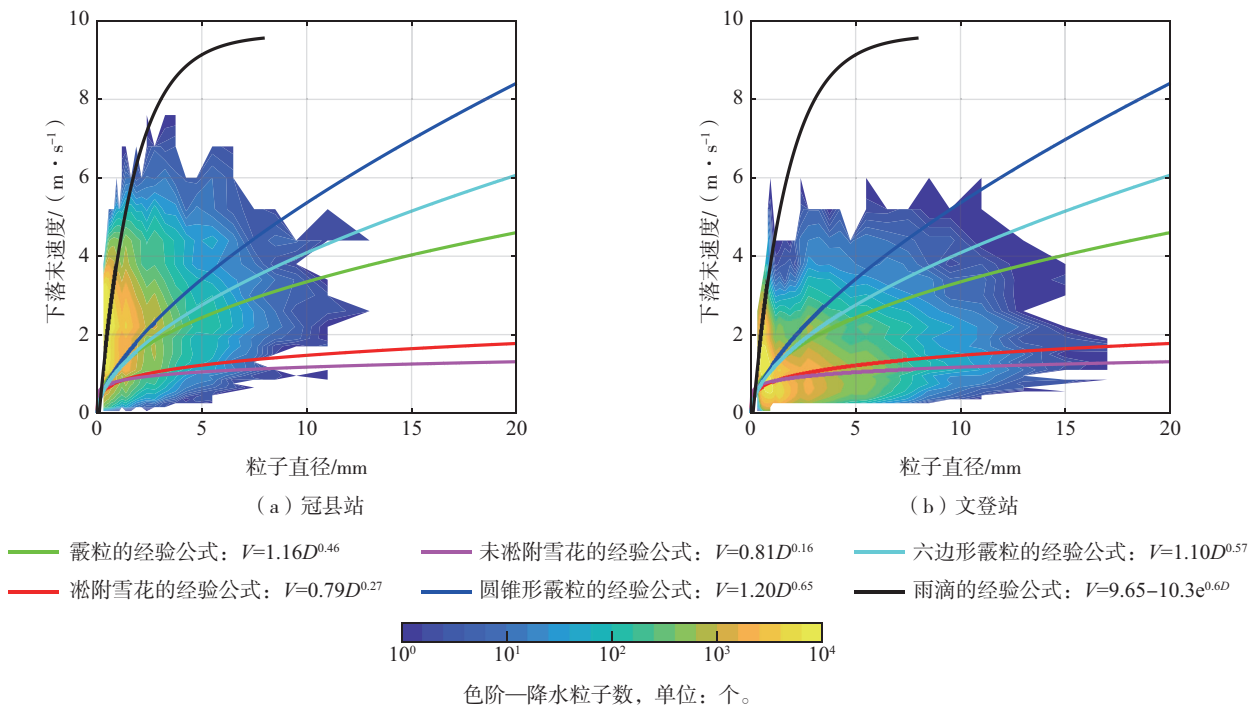


图 10 整个降雪过程中  $V$ - $D$  关系分布

Fig.10 Distribution of  $V$ - $D$  relationship in the whole snowfall process

由上述分析可知, 江淮气旋暴雪的粒子下落末速度较大而粒子直径较小, 存在较多的冰粒、霰粒和雪花; 海效应暴雪的粒子下落末速度较小而粒子直径较大, 粒子多为雪花及聚合物。结合天气形势分析可知, 江淮气旋暴雪过程存在较强的西南急流水汽输送, 水汽条件较好<sup>[2]</sup>, 近地面温度接近  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。研究表明, 在这个温度范围内, 云中过冷水含量相对较高<sup>[22]</sup>, 有利于凙附和冻结过程的发生。相比之下, 海效应暴雪的水汽来源为北方冷空气, 温度和湿度条件均较差, 过冷水含量较低, 不利于凙附过程的发生。但海效应暴雪云系中温度低于  $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 有利于聚并过程的发生<sup>[22]</sup>, 进而可形成体积较大的雪花及聚合物。

### 3.4 等效反射率因子和降雪强度关系分析

雷达反射率因子 ( $Z$ ) 和降水强度 ( $I$ ) 是预报中常用的参数。在降雪研究中, 一般用等效反射率因子 ( $Z_e$ ) 来代替  $Z$ , 用降雪强度 ( $I_s$ ) 代替  $I$ <sup>[12, 15-16, 23]</sup>。研究表明,  $Z_e$  与  $I_s$  满足形如  $Z_e = a \cdot I_s^b$  的关系, 可以此对降雪强度进行定量估计<sup>[10, 12, 15]</sup>。对整个降雪过程中的  $Z_e$  和  $I_s$  进行拟合, 得到冠县站的  $Z_e$ - $I_s$  关系为  $Z_e = 34.5I_s^{1.39}$ , 文登站为  $Z_e = 347.5I_s^{1.23}$ (图 11)。在  $I_s$  相同时, 文登站的  $Z_e$  明显大于冠县站。相比于江淮气旋暴雪, 海效应暴雪的粒子有效直径更大, 具有更多的大粒子, 而  $Z_e$  与粒子直径的六次幂正相关。因此在  $I_s$  相同时, 海效应暴雪的  $Z_e$  明显高于江淮气旋暴雪。

图 11 还给出了南京<sup>[12]</sup>和北京<sup>[15]</sup>冬季降雪的  $Z_e-I_s$  关系,分别由南京地区 2015—2019 年的 8 次降雪过程和北京地区 2021—2022 年的 8 次降雪过程拟合得到。可以看出,江淮气旋暴雪的  $Z_e-I_s$  关系与南京和北京的研究结果较为接近,而海效应暴雪则与这两地差异较大。这说明内陆暴雪和海效应暴雪的特征存在明显差异,对于不同类型的暴雪要分别建立不同的  $Z_e-I_s$  关系,以更好地估计降雪量。

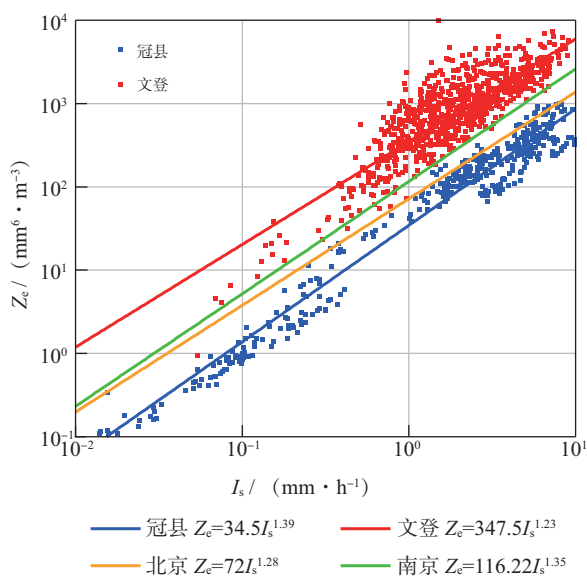


图 11 两次暴雪  $Z_e-I_s$  分布和拟合结果及其与南京<sup>[12]</sup>和北京<sup>[15]</sup>降雪  $Z_e-I_s$  关系拟合结果的对比

Fig.11 Distributions and fitting results of  $Z_e-I_s$  of two snowstorm cases, and comparison between them and fitting results of  $Z_e-I_s$  relationship of snowfalls in Nanjing<sup>[12]</sup> and Beijing<sup>[15]</sup>

## 4 结论

利用降水天气现象仪获得的雨滴谱数据等多源观测资料,对山东 2023 年 12 月江淮气旋暴雪和海效应暴雪两次形成机制不同的暴雪过程微物理特征进行对比分析,主要结论如下。

(1) 江淮气旋暴雪云系具有较高的云顶高度和较低的云顶亮温,系统发展更为深厚;海效应暴雪云系具有较低的云顶高度和较高的云顶亮温,系统比较浅薄。

(2) 两次暴雪的粒子分布谱均为单峰分布。江淮气旋暴雪的粒子数浓度高、粒子谱较窄、粒子体积

较小、降雪强度较大;海效应暴雪的粒子数浓度低、粒子谱较宽、粒子体积较大、降雪强度较小。

(3) 江淮气旋暴雪的粒子速度谱以单峰型为主,粒子下落末速度及谱宽度相对较大;海效应暴雪的粒子速度谱则多为双峰型,粒子下落末速度及谱宽度均较小。

(4) 江淮气旋暴雪含有较多的霰粒、冰粒、雪花,粒子的淞附程度相对较高;海效应暴雪的粒子以雪花为主,聚并过程更为明显。

(5) 两次暴雪  $Z_e-I_s$  关系有明显区别,江淮气旋暴雪为  $Z_e = 34.5I_s^{1.39}$ ,海效应暴雪为  $Z_e = 347.5I_s^{1.23}$ 。当  $I_s$  相同时,海效应暴雪的  $Z_e$  更大,与海效应暴雪较大的粒子体积有关。

致谢:感谢聊城市冠县气象局和威海市文登区气象局提供的观测数据。

## 参考文献:

- [1] 阎丽凤,杨成芳.山东省灾害性天气预报技术手册[M].北京:气象出版社,2014.
- [2] 杨成芳.山东暴雪[M].北京:气象出版社,2023.
- [3] 杨成芳,李泽椿.近十年中国海效应降雪研究进展[J].海洋气象学报,2018,38(4):1-10.
- [4] 刘畅,杨成芳,郑丽娜.江淮气旋影响下的山东降雪过程相态特征[J].海洋气象学报,2019,39(3):74-83.
- [5] 杨成芳,赵宇.基于加密观测的一次极端雨雪过程积雪特征分析[J].高原气象,2021,40(4):853-865.
- [6] 杨成芳,周淑玲,刘畅,等.一次入海气旋局地暴雪的结构演变及成因观测分析[J].气象学报,2015,73(6):1039-1051.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 周黎明,王俊,龚佃利,等.2009年初冬山东一次暴雪过程粒子谱特征分析[J].气象,2014,40(1):59-65.
- [10] 王俊,郑丽娜,王洪,等.山东6次台风雨雨滴谱统计特征及区域差异[J].应用气象学报,2023,34(4):475-488.
- [11] CHEN B J, HU W, PU J P. Characteristics of the raindrop size distribution for freezing precipitation

- observed in southern China[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2011, 116(D6):D06201.
- [12] TAO R T, ZHAO K, HUANG H, et al. Snow particle size distribution from a 2-D video disdrometer and radar snowfall estimation in East China[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2021, 59(1):196-207.
- [13] 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.
- [14] 贾星灿, 马新成, 毕凯, 等. 北京冬季降水粒子谱及其下落速度的分布特征[J]. *气象学报*, 2018, 76(1):148-159.
- [15] SHEN Y H, CHEN Y C, BI Y H, et al. Snowfall microphysics characterized by PARSIVEL disdrometer observations in Beijing from 2020 to 2022[J]. *Remote Sens*, 2022, 14(23):6025.
- [16] HUANG G J, BRINGI V N, CIFELLI R, et al. A methodology to derive radar reflectivity-liquid equivalent snow rate relations using C-band radar and a 2D video disdrometer[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2010, 27(4):637-651.
- [17] LOCATELLI J D, HOBBS P V. Fall speeds and masses of solid precipitation particles[J]. *J Geophys Res*, 1974, 79(15):2185-2197.
- [18] 李遥, 牛生杰, 吕晶晶, 等. 2018年冬季南京三次暴雪过程微物理特征分析[J]. *大气科学*, 2019, 43(5):1095-1108.
- [19] XU X, CHEN X L, ZHAO X, et al. Microphysical characteristics of snowfall on the southeastern Tibetan Plateau[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2023, 128(20):e2023JD038760.
- [20] BRANDES E A, IKEDA K, THOMPSON G, et al. Aggregate terminal velocity/temperature relations[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2008, 47(10):2729-2736.
- [21] LACHAPPELLE M, THOMPSON H D, LEROUX N R, et al. Measuring ice pellets and refrozen wet snow using a laser-optical disdrometer[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2024, 63(1):65-84.
- [22] KOROLEV A, McFARQUHAR G, FIELD P R, et al. Mixed-phase clouds: progress and challenges[J]. *Meteor Monogr*, 2017, 58:5.1-5.50.
- [23] VON LERBER A, MOISSEEV D, BLIVEN L F, et al. Microphysical properties of snow and their link to  $Z_e$ -S relations during BAECC 2014[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2017, 56(6):1561-1582.