

李慧, 苏立娟, 郑旭程, 等, 2021. 呼和浩特降雨和降雪过程粒子谱分布特征分析[J]. 气象, 47(1): 71-81. Li H, Su L J, Zheng X C, et al, 2021. Analysis on characteristics of particle size distribution during rain and snow processes in Hohhot[J]. Meteor Mon, 47(1): 71-81 (in Chinese).

呼和浩特降雨和降雪过程粒子谱分布特征分析*

李 慧^{1,2,3} 苏立娟^{1,2,3} 郑旭程^{1,2,3} 李汉超^{1,2,3}
李盈盈⁴ 张 敏^{2,3} 甄林峰^{2,3}

1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/中亚大气科学研究中心, 乌鲁木齐 830002

2 内蒙古自治区气象科学研究所, 呼和浩特 010051

3 内蒙古自治区人工影响天气重点实验室, 呼和浩特 010051

4 浙江省慈溪市气象局, 宁波 315300

提 要: 为深入了解呼和浩特地区降雨和降雪过程中降水粒子谱的分布特征, 利用 Parsivel 观测数据并结合常规观测资料, 对 2017—2019 年发生在呼和浩特地区的 8 次降雨过程和 10 次降雪过程的降水粒子谱进行分析。结果表明: 雨滴谱和雪花谱都比较符合 Gamma 分布, 平均降雪谱的峰值直径、峰值浓度以及最大直径均大于平均雨滴谱, 降水强度相近时, 降雪个例的粒子数浓度和尺度参数均大于降雨个例; Gamma 拟合的形状因子(μ)和斜率参数(Δ)在降雨和降雪过程中均满足二项式关系, 但雪花尺度的变化范围较大导致降雪的 μ - Δ 拟合效果略差; 雪花的下落速度小于雨滴的下落速度, 降雨过程中雨滴的下落速度多集中于 $2\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而降雪过程雪花的下落速度多集中于 $0.5\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 呼和浩特地区降雪的雪花下落速度更接近于未结凇或干雪的情况。

关键词: 降雨, 降雪, 粒子谱, 微物理特征量, 下落速度

中图分类号: P426, P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.01.007

Analysis on Characteristics of Particle Size Distribution During Rain and Snow Processes in Hohhot

LI Hui^{1,2,3} SU Lijuan^{1,2,3} ZHENG Xucheng^{1,2,3} LI Hanchao^{1,2,3}
LI Yingying⁴ ZHANG Min^{2,3} ZHEN Linfeng^{2,3}

1 Institute of Desert Meteorology, CMA/Center of Central Asia Atmospheric Science Research, Urumqi 830002

2 Meteorological Science Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010051

3 Inner Mongolia Key Laboratory of Weather Modification, Hohhot 010051

4 Cixi Meteorological Office of Zhejiang Province, Ningbo 315300

Abstract: In order to understand the characteristics of particle size distribution during rain and snow processes, ground-based measurements of particle spectrum using a Parsivel disdrometer were compared among samples obtained in 8 rain processes and 10 snow processes in Hohhot from 2017 to 2019. The results show that both the size distributions of raindrop and snowflake are in good agreement with the Gamma distribution. The spectrum width, peak concentration and corresponding diameter of snow spectrum are larger than those of raindrop spectrum, and the snow cases always have larger particle concentration and scale parameters compared to the rain cases when the precipitation intensities are similar. The parameters

* 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(IDM2018012)和内蒙古自治区气象局科技创新项目(nmqxkjcx201604)共同资助
2019 年 11 月 8 日收稿; 2020 年 11 月 18 日收修定稿

第一作者: 李慧, 主要从事大气物理及人工影响天气方向研究. E-mail: nmlh9210@163.com

通讯作者: 苏立娟, 主要从事大气物理及人工影响天气研究. E-mail: 1004526895@qq.com

μ and Δ of Gamma function correspond to the shape and slope of the spectrum, and they satisfy binomial function relationship during both rainfall and snowfall processes, but the fitting effect is poor during snowfall because of the too large-scale range of snowflake. The particle velocity is smaller for snowflake than for raindrop. The falling velocity of raindrops is mostly concentrated at $2-5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, while the falling velocity of snowflake is mostly concentrated at $0.5-2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and closer to the speed curve of unfrozen snowflake in comparison.

Key words: rainfall, snowfall, particle size distribution, microphysical characteristic quantity, falling velocity

引 言

决定降水的因素包括大中尺度的宏观天气条件和小尺度的微观过程,降水粒子谱是反映降水微观过程的重要物理量,其分布可以表明降水强度、雷达回波、粒子尺度和数浓度的大小情况(李力等,2018;沙修竹等,2019;杨俊梅等,2016)。对降水粒子谱的观测与分析,在验证和优化数值模式中的参数化方案、评估人工影响天气作业条件和作业效果、开发和改进雷达定量估测降水的算法等方面有重要应用(梅海霞等,2017;濮江平等,2010;苏立娟等,2019;Edward et al,2006)。

早期对降水粒子谱的观测主要采用滤纸色斑法,该方法原理简单、成本低廉,但耗时耗力,且无法实现连续采样。随着电子信息技术的发展,观测仪器逐渐替代了人工采样,对降水粒子谱的分析研究也越来越深入。蒋年冲等(2010)利用 Parsivel 雨滴谱仪在安徽一次强雨雪天气过程中采集到的数据,对毛毛雨、毛毛雨与雨、雨、雨夹雪、雪、冻雨六类降水的粒子谱进行对比分析,发现不同类型降水粒子中雨夹雪的平均数浓度最大,降雪粒子谱最宽。尹丽云等(2017)对滇中一次强雨雪过程的粒子谱特征进行分析,发现雪粒子平均直径小于雨粒子平均直径,对粒子下落速度的分析表明雨粒子下落速度较快,表现出冻滴附着的显著特征,而雪粒子则以冰晶单一增长为主要特征。Yuter et al(2006)利用 Parsivel 数据对雨雪混合降水、纯降雨和纯降雪过程的粒子下落速度进行分析,发现随温度变化,湿雪粒子存在不同程度的融化,导致湿雪粒子下落速度的标准差较大,是同等尺度干雪花下落速度标准差的 $120\% \sim 230\%$,因此湿雪粒子的碰并效率较高。胡云涛等(2017)、李遥等(2019)、苏立娟等(2019)通过粒子谱数据对不同地区降雨和降雪过程的微物理

特征进行了分析研究。

呼和浩特地区属于典型的干旱半干旱气候,年平均降水量仅为 $250 \sim 350 \text{ mm}$,且多集中于夏季(6—8月)(顾润源等,2012;苏立娟等,2019),降水相态的转变主要发生在 3—4 月和 10—11 月(张志杰和王志楠,2017)。不同强度、不同相态的降水会对人民生命财产安全、农牧业生产以及交通运输等产生不同程度的影响,同时呼和浩特地区由于气候干燥少雨,对人工增雨作业的需求量较大,这就需要加深对降水过程的认识并对其进行准确预报,而关于降水粒子谱的分析和研究在其中扮演了很重要的角色。之前对降水粒子谱分布的研究多关注于降雨过程,对降雪过程及其与降雨过程的对比分析较少,本文利用呼和浩特地区 Parsivel 粒子谱仪的长期采样数据,对降雨和降雪过程的粒子谱分布进行对比分析,以期为本地区降水的估测预报以及人工影响天气作业提供科学依据。

1 采样仪器和数据处理

1.1 采样仪器和观测数据

试验采用 Parsivel 粒子谱仪对降水粒子谱进行测量,它是以激光测量为基础的粒子测量传感器,可以同时测量降水粒子的尺度和下落速度,其记录的粒子直径范围为 $0.2 \sim 25 \text{ mm}$,下落速度范围为 $0.2 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,尺度和速度测量均分为 32 个非等间距的测量通道。另外,对于降水过程,根据测量范围内粒子的数量和降水强度,Parsivel 可以实现对降水类型的判别和编码。

内蒙古自治区气象科学研究所(以下简称研究所)位于呼和浩特市新城区,架设在研究所平台处的 Parsivel 粒子谱仪可以对局地降水过程进行长期监测,本文选取 2017 年 1 月至 2019 年 5 月该仪器的

观测数据,依据 Parsivel 记录的天气现象代码和自动站观测的降水资料,从中筛选了 8 个降雨和 10 个降雪个例进行分析。

1.2 数据预处理

本文对观测数据进行了两方面的质量控制:(1)剔除了前两个尺度档(直径 $D < 0.3$ mm)和下落速度大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的观测数据;(2)剔除了采样粒子个数小于 10 个的样本。经过质量控制,共筛选出降雨样本 2 804 个,降雪样本 2 105 个,样本数量足够多,可以保证统计结果的可靠性。

Parsivel 直接输出的是采样时间间隔内通过采样区域的粒子个数,为便于谱型分析和计算特征量,需要将其转换为单位体积、单位尺度间隔内的粒子数浓度 $N(D_i)$ (单位: $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$):

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{32} \frac{n_{ij}}{A \cdot \Delta t \cdot V_j \cdot \Delta D_i} \quad (1)$$

式中: n_{ij} 表示第 i 个尺度档、第 j 个速度档中的粒子个数, A 是仪器的采样面积(单位: m^2), Δt 是采样时间间隔, ΔD_i 表示第 i 个尺度区间的尺度间隔, V_j 为第 j 个速度区间对应的下落速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

1.3 微物理特征量的计算

由滴谱数据计算降水强度 R (单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)的方法为:

$$R = 3.6 \sum_{i=3}^{32} \sum_{j=1}^{26} M(D_i) V_j N(D_i, V_j) \Delta D_i \quad (2)$$

式中: $M(D_i)$ 表示降水粒子的质量, $N(D_i, V_j)$ 表示直径在第 i 个尺度区间、下落速度在第 j 个速度区间的粒子数浓度,由于质量控制时剔除了前两个尺度档和下落速度大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的数据,故公式中只计算 3~32 尺度档和 1~26 速度档,对于雨滴而言:

$$M(D_i) = \frac{\pi}{6} D^3 \rho_w \quad (3)$$

式中 ρ_w 为水的密度。

对于雪花而言,由于雪花并非球形,Parsivel 测得的是雪花的最大水平维度,该仪器在测量降水粒子时将粒子假设为椭球体并进行了轴比(a_r)订正,当粒子直径 $D \leq 1$ mm 时, a_r 为 1;当 $1 \text{ mm} < D \leq 5$ mm 时, a_r 在 $0.7 \sim 1.0$ 线性变化;当 $D > 5$ mm 时, a_r 为 0.7。在计算降雪强度时,式(2)中雪花的质量:

$$M(D_i) = \rho_s V \quad (4)$$

式中: ρ_s 为雪花密度,根据 Boudala et al(2014)的研究结论: $\rho_s = 0.17 D^{-1}$; V 为雪花体积,根据椭球形假设: $V = 4/3 \pi A^2 B$,其中 A 、 B 分别为雪花的长轴和短轴,且 $B = a_r A$,由仪器测得的粒径 D_{par} 可以计算 A 、 B 的值:

$$D_{\text{par}} = 2A a_r^{1/3} = 2B a_r^{-2/3} \quad (5)$$

另外,在后续进行 Z - R 关系拟合时,还需要用到样本对应的雷达反射率因子的值(Z ,单位: $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$),由滴谱数据可计算得到 Z :

$$Z = \sum_{i=3}^{32} D_i^6 N(D_i) \Delta D_i \quad (6)$$

本文还对两类降水粒子谱的总数浓度(N_t)、质量加权谱的标准差(σ_m)以及各类尺度参数进行了分析,其中尺度参数包括算术平均直径(\bar{D})、中值直径(D_{mid})、优势直径(D_{pre})、最大直径(D_{max})。陈聪(2013)、杨长业等(2016)对这些微物理特征量以及尺度参数的物理意义和计算公式进行了详细说明,在此不再赘述。

2 结果分析

2.1 平均谱分布及 Gamma 拟合

由平均粒子谱分析降雨和降雪过程中降水粒子的分布情况(图 1),由图可见,两类降水粒子谱均呈单峰型分布,雪花谱的峰值浓度($1\,426.44 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$)、峰值直径(0.81 mm)以及最大直径(19 mm)均大于雨滴谱(峰值浓度: $402.30 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$,峰值直径: 0.56 mm ,最大直径: 4.75 mm),说明相比于降雨过程,降雪过程中有更多的降水粒子,同时粒子尺度也比较大。降水粒子谱的拟合公式在降水过程的遥感探测和模式参数化计算中有重要作用(Tang et al, 2014),常用的拟合方法有 M-P 分布和 Gamma 分布,很多研究表明(胡云涛等, 2017;胡子浩等, 2013; Niu et al, 2010),降雨和降雪过程的粒子谱分布更接近于 Gamma 分布。图 1 中的曲线为 Gamma 拟合的结果,拟合三参数在表 1 中给出(N_0 、 μ 、 Λ 分别为截距参数、形状因子和斜率参数)。由图可见, Gamma 拟合高估了小尺度端雪花的数浓度,在雨滴谱的大尺度端也存在一定的偏差,但总体来说拟合效果较好,大部分观测散点均落在了拟合曲线上。

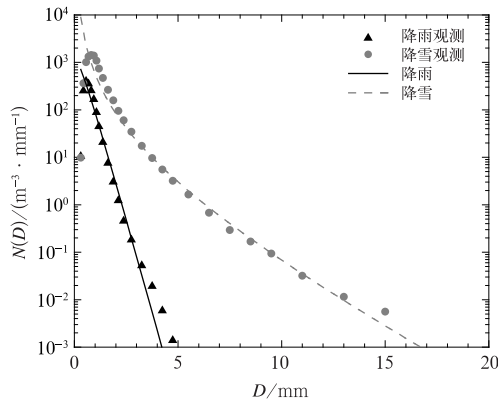


图 1 降雨和降雪样本的观测平均谱
及 Gamma 拟合

Fig. 1 Observation average spectrum and Gamma fitting of rainfall and snowfall processes

表 1 降雨和降雪平均谱 Gamma 拟合参数
Table 1 The mean spectrum parameters of
Gamma distribution fitting of rainfall
and snowfall processes

类型	$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\Delta D)$		
	N_0	μ	Δ
降雨	3525.67	0.38	3.70
降雪	911.25	-2.08	0.47

2.2 微物理特征量

降水过程的微物理特征量可以反映降水的性质和变化特征(Edward et al, 2006), 表 2 给出了 8 个降

雨和 10 个降雪个例的降水强度(R)、雷达反射率因子(Z)、总数浓度(N_t)、质量加权平均谱的标准差(σ_m)以及 4 种尺度参数: 算术平均直径(\bar{D})、中值直径(D_{mid})、最大直径(D_{max})、优势直径(D_{pre})。由表中数据分析发现: (1) 降雨过程的粒子数浓度和尺度参数多小于降雪过程。降雨个例中 N_t 在 $100 \sim 300 \text{ m}^{-3}$ 取值, 降雪个例 N_t 最小值与降雨相近, 但最大可达 2186.70 m^{-3} (Snow_case04)。尺度参数方面, 以 \bar{D} 和 D_{max} 为例, 降雨个例的 \bar{D} 均小于 1 mm , 所有降雨个例的平均 \bar{D} 为 0.77 mm , 降雪个例中 \bar{D} 最大为 1.87 mm , 所有降雪个例的平均 \bar{D} 为 1.27 mm ; 与平均谱分布的分析结果相似, 所有降雪个例的 D_{max} 都大于降雨个例, Snow_case07 和 Snow_case08 个例的最大直径甚至达到了 19 mm 。(2) D_{pre} 表示对含水量贡献最多的直径, 在降雨个例中多为 1 mm 左右, 黄兴友等(2019)对南京降雨个例的分析发现 D_{pre} 基本在 $1 \sim 3 \text{ mm}$, 说明呼和浩特地区降雨的雨滴尺度小于南京地区, 结合 2019 年中国统计年鉴(国家统计局, 2019)中的数据呼和浩特年平均相对湿度为 45% , 南京年平均相对湿度为 73% , 分析认为呼和浩特气候较为干燥导致雨滴下落蒸发消耗多。对于降雪过程, D_{pre} 的最大值可达 5.5 mm 。(3) Rain_case01 和 Snow_case01, Rain_case06 和 Snow_case06 的降水强度非常相近, 但降雪个例对应的 Z 、 N_t 、 σ_m 以及各类尺度参数都远大于对应的降雨个例, 这可能与雪花密度和下落速度较小有关。

表 2 各降雨和降雪个例微物理特征量的平均值

Table 2 Average values of microphysical parameters for all rainfall and snowfall cases

降水型态	编号	$R/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	$Z/(\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3})$	N_t/m^{-3}	σ_m/mm	\bar{D}/mm	D_{mid}/mm	D_{max}/mm	D_{pre}/mm
降雨	Rain_case01	0.37	55.26	154.89	0.30	0.66	0.56	2.75	0.69
	Rain_case02	2.04	1337.36	225.50	0.69	0.79	0.69	3.75	0.81
	Rain_case03	0.83	223.30	206.47	0.43	0.73	0.56	3.75	0.94
	Rain_case04	1.47	380.13	289.71	0.40	0.77	0.69	2.75	0.94
	Rain_case05	1.15	395.28	277.08	0.51	0.74	0.69	4.75	0.94
	Rain_case06	0.66	243.34	116.56	0.51	0.78	0.69	3.75	0.94
	Rain_case07	0.56	179.75	123.61	0.49	0.75	0.69	3.75	0.94
	Rain_case08	5.04	6242.31	265.19	0.93	0.96	0.81	4.75	1.38
降雪	Snow_case01	0.37	444.29	374.69	1.84	1.32	0.94	11.00	2.75
	Snow_case02	0.10	70.87	929.75	0.92	0.80	0.69	6.50	0.69
	Snow_case03	0.48	442.15	1675.51	1.26	1.10	0.94	13.00	1.38
	Snow_case04	1.07	941.15	2186.70	1.46	1.18	0.94	11.00	1.38
	Snow_case05	0.24	284.15	1111.35	1.85	0.89	0.69	15.00	0.81
	Snow_case06	0.67	258.57	781.06	1.13	1.20	0.94	11.00	1.38
	Snow_case07	0.70	903.10	1293.93	1.82	1.23	0.94	19.00	1.38
	Snow_case08	0.70	1749.96	129.80	4.24	1.74	1.06	19.00	5.50
	Snow_case09	0.97	1644.35	293.83	2.59	1.87	1.19	15.00	5.50
	Snow_case10	0.16	285.27	129.21	2.35	1.33	0.81	9.50	5.50

(4) σ_m 表示单位体积内所有粒子直径与其质量加权平均直径之间的偏离程度,降雨过程 σ_m 基本在 0.3~1.0 mm,降雪过程中较大(0.9~5.0 mm),且在降雨过程中 σ_m 基本随雨强的增大而增大,降雪过程中其值随降雪强度没有确定的变化规律。

为了了解不同尺度的降水粒子对微物理参量的贡献,将降雨和降雪粒子按直径 D 的大小划分为四个档: D_1 为 $0.31 \text{ mm} \leq D \leq 0.94 \text{ mm}$, D_2 为 $0.94 \text{ mm} < D \leq 2.75 \text{ mm}$, D_3 为 $2.75 \text{ mm} < D \leq 4.75 \text{ mm}$ 以及 D_4 为 $D > 4.75 \text{ mm}$,图 2a,2b 分别给出了降雨和降雪过程中各尺度档粒子对 N_t 、 R 以及 Z 的贡献。由图可见,降雨过程中(图 2a),雨滴数浓度主要来源于 D_1 档的贡献,其数浓度占比接近 90%; D_1 档雨滴也是 R 贡献的主要来源, D_2 档雨滴对 R 的贡献也较大,为 34.43%; Z 正比于粒子尺度的 6 次方,其受尺度的影响远大于粒子数浓度的影响, D_2 尺度档雨滴虽数目较少,但其尺度大,对 Z 的贡献超过了 50%,略高于 D_1 档的 48.9%; D_3 档雨滴的数目极少,对各微物理量的贡献也微乎其微;仪器没有观测到 $D > 5 \text{ mm}$ 的雨滴。相比于降雨而言,降雪过程中(图 2b), D_1 档雪花对各微物理量的贡献

都明显下降,同时 D_2 、 D_3 、 D_4 档雪花的贡献显著增大,其中 D_1 、 D_2 档雪花对 N_t 的贡献相近,分别为 54.60%和 41.74%,两档的贡献之和超过 95%; D_2 档雪花是 R 和 Z 贡献的主要来源,对两者的贡献均超过了 50%。

由粒子谱分布及其微物理特征量的时序变化可以进一步分析降水的形成演变规律,本文分别选取了一个持续时间较长并具有代表性的降雨和降雪个例,对个例中降水粒子谱的分布、 R 、 N_t 、 \bar{D} 以及 $D < 1 \text{ mm}$ 的雨滴对总数浓度的贡献(N_1/N_t)随时间的演变情况进行了分析。图 3 给出了 2018 年 4 月 12—13 日降雨过程(Rain_case 03)中雨滴谱分布及微物理特征量的变化,由图可见, N_t 和 \bar{D} 与 R 的变化趋势较为一致,但在降雨初期 \bar{D} 的演变较为平稳,其值基本在 0.7 mm 上下浮动。雨强增大时,由于大雨滴增多, $D < 1 \text{ mm}$ 的 N_1/N_t 会出现明显的下降趋势,其余时刻多接近于 1。说明降雨过程中雨强的增大多来源于雨滴尺度的增加。

图 4 为 2019 年 2 月 14 日降雪过程(Snow_case 07)中雪花谱及微物理特征量的时序演变,由于降雪过程中雪花谱 D_{\max} 、 N_t 以及特征尺度都大于降雨过程,故图 4 选取的纵坐标范围与图 3 有所不同。与降雨过程类似,降雪过程中,多数情况下随降雪强度的增大,雪花谱 D_{\max} 和 \bar{D} 增大, N_t 增加。 $D < 1 \text{ mm}$ 的雪花对总数浓度的贡献 N_1/N_t 远小于降雨过程,与降雪强度有相反的变化趋势。

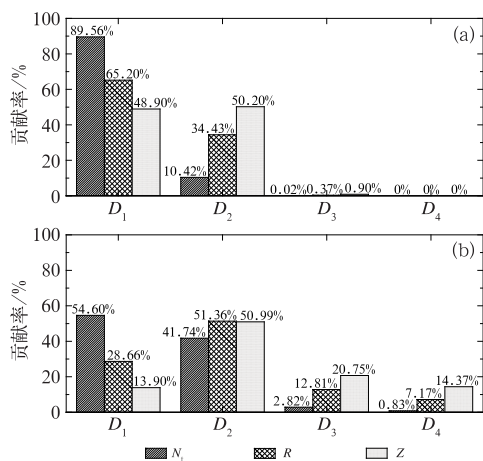


图 2 (a)降雨和(b)降雪过程中不同尺度的粒子对总数浓度(N_t)、降水强度(R)以及雷达反射率因子(Z)的贡献
Fig. 2 Contributions to total concentration (N_t), precipitation intensity (R) and radar reflectivity factor (Z) from different sizes of particles during the processes of rainfall (a) and snowfall (b)

2.3 μ - Λ 拟合

研究表明 Gamma 拟合的三参数中, μ 和 Λ 之间存在二项式关系,且这种相关关系在雷达定量估测降水中有重要应用。图 5a 是降雨和降雪过程 μ - Λ 关系的拟合,由于弱降水的统计变化和观测误差均较大,仅挑选了 $R > 0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的样本进行拟合,满足筛选条件的降雨样本共 1387 个,降雪样本共 981 个,表 3 列出了拟合参数和相关系数。由图可见,降雨和降雪过程的 μ 和 Λ 均有较好的二项式关系,其中降雨过程拟合相关系数为 0.95,降雪过程拟合效果较差,拟合相关系数为 0.84,由图 5a 可见有一小部分降雪散点明显偏离了拟合曲线(方框中的样本),剔除这部分样本后拟合效果明显改善,相关系数可达到 0.91。为了分析造成偏差的原

因,分别选取了 3 个方框中的样本和 3 个拟合效果较好的降雪样本,对其谱分布进行分析,图 5b 给出了对比结果,图中 3 条实线对应的是方框中的样本,3 条虚线为拟合效果较好的对比样本,由图可见,实线对应的雪花谱的谱宽明显大于虚线,峰值浓度明显偏小,且偏离样本的雪花谱存在较多的空值,谱线间断多。另外,分析发现偏离样本中有 6 个来自于 2019 年 2 月 25 日的降雪过程(Snow_case08),由表 2 可知该次降雪过程平均谱的最大粒子尺度和各类尺度参数均较大,质量加权平均谱的标准差也明显大于其他降雪个例,由此推测粒子尺度太大同时样本数据存在较多空值可能是导致这些样本偏离拟合曲线的原因。

图 6 对呼和浩特地区降雨、降雪以及佛罗里达地区(Zhang et al, 2003)和南京地区(杨长业等, 2016)降雨过程的 μ - Δ 拟合曲线进行了对比,分析

图示结果可以发现,在 $\Delta > 1$ 的范围内,呼和浩特降雪过程的拟合曲线位于三条降雨拟合曲线的上方,即对于相同的 Δ 值,降雪过程对应的 μ 最大,这主要是由于降雪过程雪花的尺度较大。杨长业等(2016)对南京降雨的拟合结果与呼和浩特地区降雨的拟合结果较为相近,拟合曲线有两个交点,中段南京降雨的拟合曲线位于上方,两端则相反。

2.4 下落速度分析

降水粒子的下落速度不仅与粒子的大小、形状有关,而且还受到气象因素,如垂直气流、气压等的影响(李慧等,2018),Parsivel 可以同时测量降水粒子的尺度和下落速度。图 7 为降雨和降雪过程中降水粒子数随尺度和下落速度的分布,图 7a 中红色实线代表 Atlas et al(1973)经典雨滴下落末速度,图 7b 中灰色实线为未结凇雪花的下落末速度,虚线

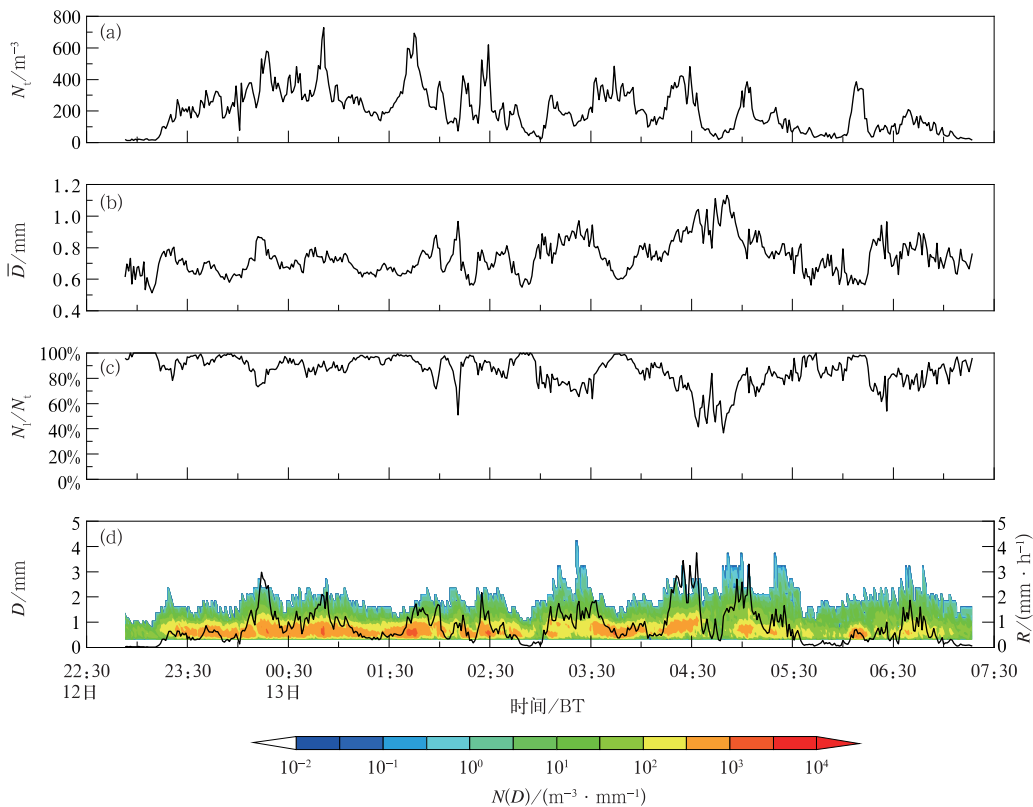


图 3 2018 年 4 月 12—13 日降雨过程(Rain_case 03)(a) N_t , (b) \bar{D} , (c) $D < 1$ mm 的雨滴对总数浓度贡献的时间序列, (d) 雨滴个数随时间和直径的变化(填色)及降水强度(黑线)的时间序列
Fig. 3 Variations of (a) total concentration, (b) arithmetic mean diameter, (c) contribution of raindrops with diameter less than 1 mm to total concentration, (d) raindrop number with time and diameter (colored) and precipitation intensity (black line) during the rainfall in 12—13 April 2018 (Rain_case 03)

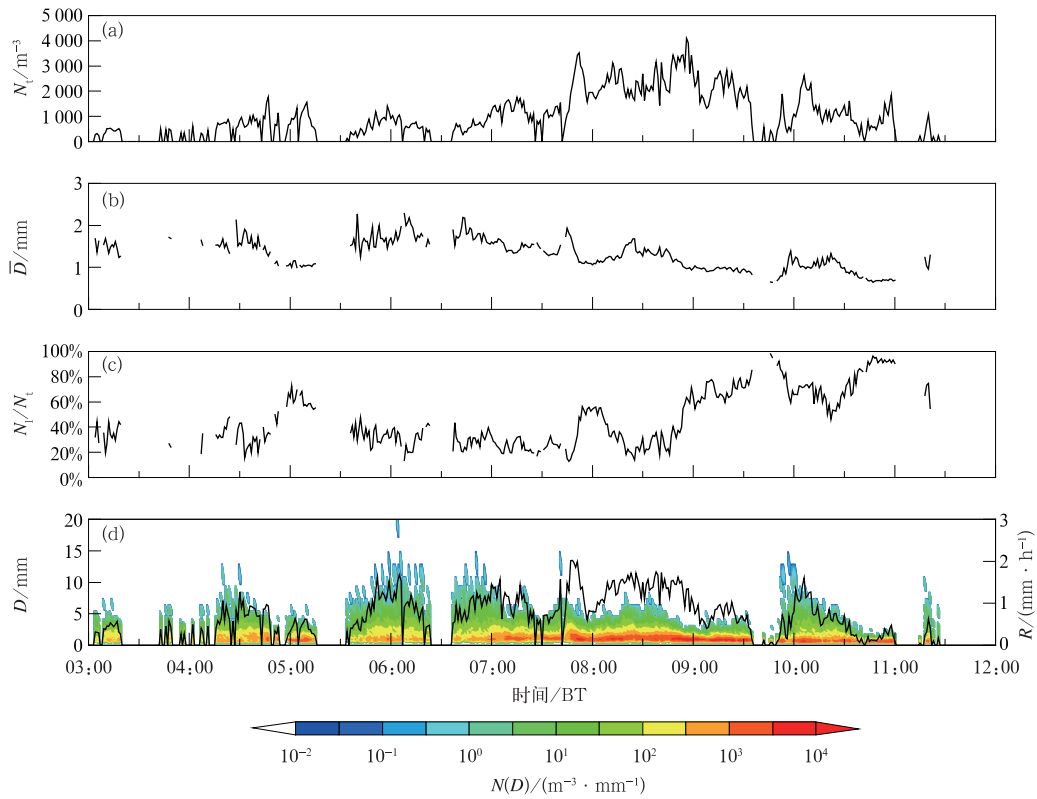


图 4 同图 3, 但为 2019 年 2 月 14 日降雪过程(Snow_case 07)

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the snowfall on 14 February 2019 (Snow_case 07)

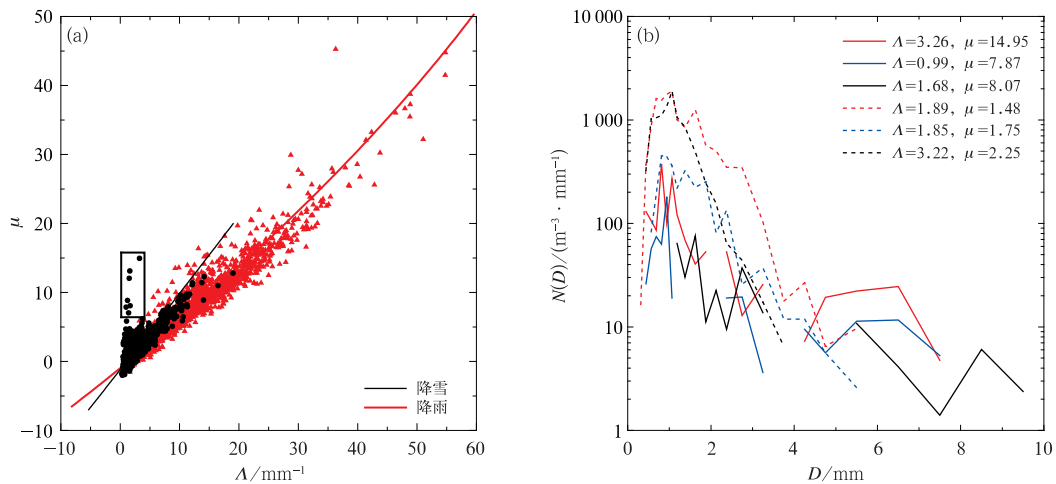


图 5 (a)降雨和降雪过程的 μ - λ 拟合(方框圈出了 7 个与拟合曲线有明显偏离的样本),

(b)方框中的样本(实线)和其他拟合效果较好的降雪样本(虚线)的粒子谱分布对比

Fig. 5 (a) Fitted μ - λ relations of rainfall and snowfall (Samples in the box have a significant deviation from the fitted curve compared to other snowfall samples),

(b) comparison between the spectrum of samples in the box (solid lines) and other snow samples with good fitting effects (dashed lines)

为结凇雪花的下落末速度。可以发现,降水粒子并不是严格以理论下落末速度降落的,对于降雨而言,

Atlas 末速度曲线穿过了速度图中的数浓度极值区,具有较好的代表性,对于降雪过程,呼和浩特降

表 3 降雨和降雪过程 μ - Λ 拟合参数及相关系数 (r^2)Table 3 Coefficients of the fitted μ - Λ relations for rainfall and snowfall processes

类型	$\Lambda = a\mu^2 + b\mu + c$			r^2
	a	b	c	
降雨	-0.0054	1.4289	1.4112	0.9534
降雪	-0.00054	0.9101	1.0836	0.8424

雪的雪花下落速度更接近于未结凇的情况,数浓度最大对应的下落速度略低于未结凇雪花下落末速度。降雨过程中雨滴的下落速度多集中于 $2 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 雪花下落速度较小多集中于 $0.5 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 即使是 $D > 6 \text{ mm}$ 的雪花其下落速度也不超过 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图 8 给出了两类降水粒子的平均速度谱特征,由图可见,降雨过程雨滴的最大下落速度 ($8.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 大于降雪过程中雪花的最大下落速度 ($7.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。降雨和降雪的速度谱均为单峰型分布,但峰

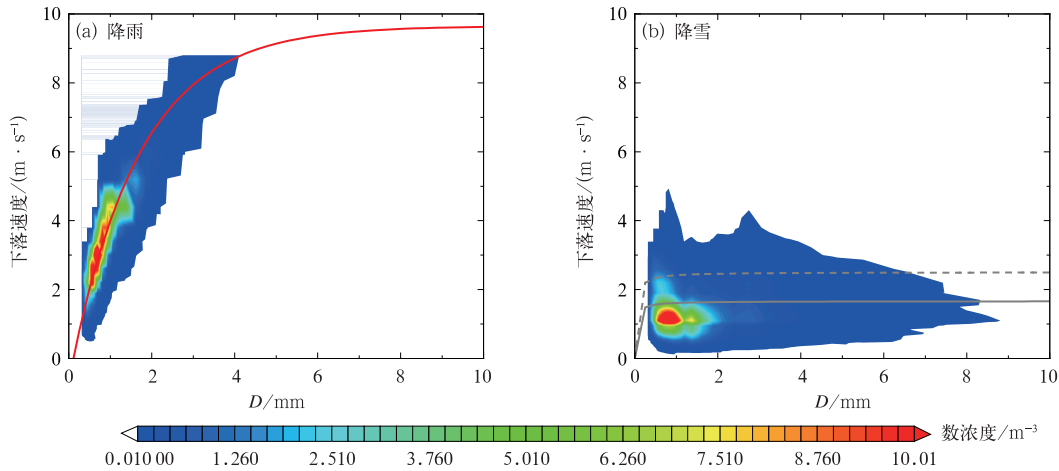


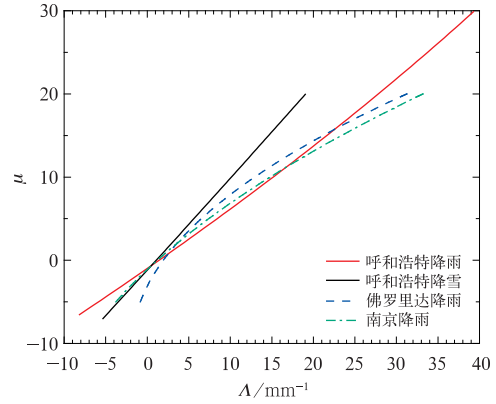
图 7 (a)降雨和(b)降雪过程中观测得到的粒子数随直径和下落速度的分布

(图 7a 中红色实线为雨滴下落末速度,图 7b 中灰色实线和虚线分别为未结凇雪花和结凇雪花的下落末速度)

Fig. 7 Observed numbers of particles as a function of the drop diameter and fall velocity during the processes of rainfall (a) and snowfall (b)

(Red curve in Fig. 7a is the fitted terminal velocity of raindrop, gray solid and dashed lines in Fig. 7b represent the terminal velocity of the unfrosted and frosted snowflakes, respectively)

值所处的位置和大小有较大差异,降雨过程中下落速度在 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的雨滴数最多为 32.65 min^{-1} ,而降雪过程中,雪花数浓度峰值出现在 $1.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下落速度附近,为 87.83 min^{-1} 。结合图 7 结果,说明雪花的下落速度明显低于雨滴的下落速度,这也是表 2 中 Rain_case01 和 Snow_case01、Rain_case06 和 Snow_case06 这两对个例在雪花尺度和数浓度远大于雨滴尺度和数浓度时,它们的降水强度却相近的原因之一。

图 6 呼和浩特地区降雨和降雪过程 μ - Λ 拟合结果与佛罗里达地区、南京地区拟合结果的对比Fig. 6 Comparison of μ - Λ fitting results of rainfall and snowfall in Hohhot with that in Florida and Nanjing

2.5 Z-R 关系拟合

由粒子谱分布情况拟合 Z 与 R 的关系,是雷达定量估测降水的主要方法,研究表明 Z - R 满足幂指数关系: $Z = aR^b$,明确公式中的系数 a 、 b ,就可以利用雷达反射率因子对降水强度进行反演。一般情况下,业务气象雷达的内置 Z - R 关系为 $Z = 300R^{1.4}$,实际上 Z - R 拟合参数会随着观测地点、降水类型、粒子尺度等变化。利用挑选出的降雨和降雪个例,

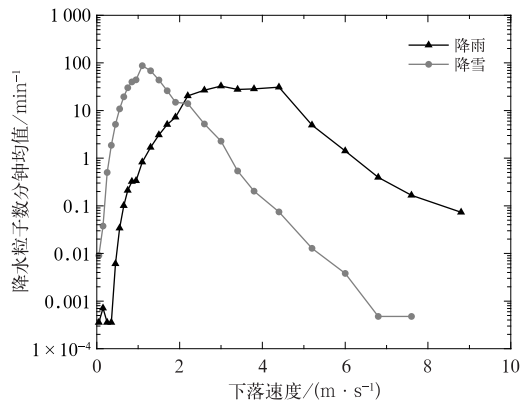


图 8 降水粒子数随下落速度的分布
Fig. 8 Distributions of raindrops and snowflakes with falling velocity

对呼和浩特地区降水过程的 $Z-R$ 关系做拟合,表 4 给出了拟合参数及相关系数。由表可见,18 个个例的拟合效果均较好,除 Rain_case03 外,其余个例的拟合相关系数(r^2)均大于 0.80,幂指数函数可以很好地描述降雨和降雪过程的 $Z-R$ 关系。

对于降雨过程而言,系数 a 取值在 150~400,指数 b 的变化较小(为 1.20~1.50),将降雨个例的拟合参数取平均值得到: $Z=221.19R^{1.39}$ 。对于降雪过程而言,系数 a 的值在 700~2600,系数 b 在

1.15~2.17 变化,10 个降雪个例拟合参数取平均得到: $Z=1437.89R^{1.42}$ 。选取降雪个例中拟合系数 a 最小的 Snow_case04($a=706.62$)和拟合系数 a 最大的 Snow_case10($a=2592.15$),对比两者的粒子

表 4 降雨和降雪过程 $Z-R$ 拟合参数及相关系数(r^2)

Table 4 Coefficients of the fitted $Z-R$ relations for rainfall and snowfall processes

编号	$Z=aR^b$		
	a	b	r^2
Rain_case01	151.27	1.22	0.89
Rain_case02	185.29	1.43	0.98
Rain_case03	221.16	1.29	0.79
Rain_case04	155.99	1.41	0.97
Rain_case05	155.54	1.41	0.93
Rain_case06	294.38	1.48	0.83
Rain_case07	239.11	1.40	0.83
Rain_case08	366.76	1.50	0.97
Snow_case01	1830.86	1.57	0.86
Snow_case02	1268.84	1.38	0.97
Snow_case03	848.97	1.25	0.88
Snow_case04	706.62	1.15	0.90
Snow_case05	1114.52	1.33	0.87
Snow_case06	947.63	2.17	0.86
Snow_case07	1192.43	1.39	0.94
Snow_case08	2197.69	1.38	0.95
Snow_case09	1679.15	1.15	0.96
Snow_case10	2592.15	1.40	0.95

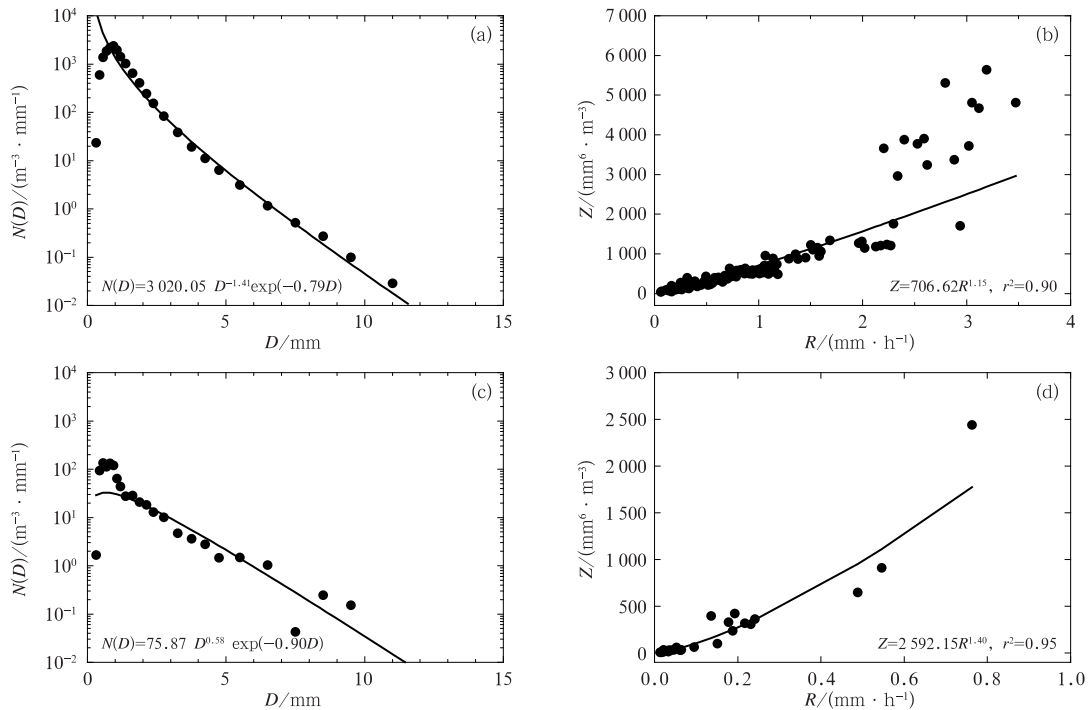


图 9 降雪个例(a,b)Snow_case04 和(c,d)Snow_case10 的(a,c)粒子谱分布和(b,d) $Z-R$ 拟合

Fig. 9 (a, c) Partical spectral distribution and (b, d) $Z-R$ fitting of (a, b) Snow_case04, and (c, d) Snow_case10

谱分布情况(图 9)。可以发现,两个个例的谱宽相差不大,但峰值浓度相差一个数量级,结合表 2 中微物理特征量的统计结果和图 9 中给出的 Gamma 拟合函数, Snow_case04 个例的雪花 N_0 最大且其 Gamma 拟合的 N_0 远大于 Snow_case10, von Lerber et al(2017)对降雪过程 Z-R 拟合的研究发现,拟合系数 a 与 Gamma 拟合的 N_0 呈明显反相关关系,本文结论与此一致。

3 结论与讨论

本文利用 2017 年 1 月至 2019 年 5 月架设在内蒙古自治区气象科学研究所平台处的 Parsivel 粒子谱仪采集到的数据,从中筛选了 8 次降雨过程和 10 次降雪过程,对降雨和降雪过程的粒子谱分布、微物理特征量以及降水粒子的下落速度进行对比分析,得到以下几点结论:

(1)呼和浩特地区的降雨谱和降雪谱比较符合 Gamma 分布,雪花谱的峰值浓度、峰值直径以及最大粒子尺度均大于雨滴谱。降水强度相近时,降雨个例的粒子数浓度和尺度参数均小于降雪个例。

(2)降雨过程直径 $D < 1$ mm 的雨滴对总数浓度和雨强的贡献最大,雷达反射率因子主要来源于 $1 \text{ mm} < D < 3 \text{ mm}$ 的雨滴;降雪过程中 $D < 1$ mm 的雪花对总数浓度的贡献最大,而降雪强度和雷达反射率因子主要来源于 $1 \text{ mm} < D < 3 \text{ mm}$ 雪花的贡献。

(3)降雨谱和降雪谱的形状因子 μ 和斜率参数 Δ 均满足二项式关系,但降雪过程的拟合效果较差,其中偏离拟合曲线的降雪样本其谱数据存在较多空值且粒子尺度和谱宽明显大于其他样本,剔除偏离样本后拟合效果明显改善。

(4)降雨过程中雨滴的落速多集中于 $2 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,降雪过程中雪花的下落速度较小多集中于 $0.5 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Atlas 经典落速可以很好地代表呼和浩特地区降雨过程雨滴的下落速度,呼和浩特降雪的雪花落速更接近于未结凇的情况。

以往的很多研究都表明,由于气候、大气状况以及地形条件的差异,雨滴谱分布存在明显的时空变化,同时层状云、对流云降水的谱分布也有明显不同。而本文研究发现不同相态的降水在粒子谱分布和特征参量上也存在明显的差异,因此在降水的雷达定量估测和数值预报中对不同相态的过程分别进

行讨论是非常重要的,今后将在这一方面进行详细研究。

参考文献

- 陈聪,2013. 黄山不同高度雨滴谱演变特征分析[D]. 南京:南京信息工程大学. Chen C, 2013. Analysis of raindrop size distribution at different altitudes in Mt. Huang[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 顾润源,孙永刚,韩经纬,等,2012. 内蒙古自治区天气预报手册[M]. 北京:气象出版社:51-52. Gu R Y, Sun Y G, Han J W, et al, 2012. Inner Mongolia Autonomous Region Weather Forecast Handbook[M]. Beijing: China Meteorological Press: 51-52 (in Chinese).
- 国家统计局,2019. 中国统计年鉴-2018[M]. 北京:中国统计出版社. National Bureau of Statistics, 2019. China Statistical Yearbook-2018[M]. Beijing: China Statistics Press(in Chinese).
- 胡云涛,高太长,曾培培,等,2017. 2014-2016 年南京地区降雪微物理特征[J]. 气象与减灾研究,40(2):107-110. Hu Y T, Gao T C, Zeng P P, et al, 2017. Analysis of the micro-physical characteristics of snow in Nanjing Area[J]. Meteor Dis Reduct Res, 40(2):107-110(in Chinese).
- 胡子浩,濮江平,张欢,等,2013. 庐山地区层状云和对流云降水特征对比分析[J]. 气象与环境科学,36(4):43-49. Hu Z H, Pu J P, Zhang H, et al, 2013. Characteristics comparison analysis of stratiform cloud and convective cloud precipitation in Lushan [J]. Meteor Environ Sci, 36(4):43-49(in Chinese).
- 黄兴友,印佳楠,马雷,等,2019. 南京地区雨滴谱参数的详细统计分析及其在天气雷达探测中的应用[J]. 大气科学,43(3):691-704. Huang X Y, Yin J N, Ma L, et al, 2019. Comprehensive statistical analysis of rain drop size distribution parameters and their application to weather radar measurement in Nanjing[J]. Chin J Atmos Sci, 43(3):691-704(in Chinese).
- 蒋年冲,胡雯,邵洋,等,2010. 安徽大别山一次强雨雪天气过程降水粒子特征分析[J]. 气象,36(6):79-84. Jiang N C, Hu W, Shao Y, et al, 2010. Analysis of characteristics of precipitation particle on heavy rain-snow process in Dabie Mountain in Anhui Province[J]. Meteor Mon, 36(6):79-84(in Chinese).
- 李慧,银燕,单云鹏,等,2018. 黄山层状云和对流云降水不同高度的雨滴谱统计特征分析[J]. 大气科学,42(2):268-280. Li H, Yin Y, Shan Y P, et al, 2018. Statistical characteristics of raindrop size distribution for stratiform and convective precipitation at different altitudes in Mt. Huangshan[J]. Chin J Atmos Sci, 42(2):268-280(in Chinese).
- 李力,姜有山,蔡凝昊,等,2018. Parsivel 降水粒子谱仪与观测站雨量计的对比分析[J]. 气象,44(3):434-441. Li L, Jiang Y S, Cai N H, et al, 2018. Contrastive analysis of Parsivel precipitation particle spectrometer data and Pluviometer data [J]. Meteor Mon, 44(3):434-441(in Chinese).
- 李遥,牛生杰,吕晶晶,等,2019. 2018 年冬季南京三次暴雪过程微物理特征分析[J]. 大气科学,43(5):1095-1108. Li Y, Niu S J, Lv J

- J, et al, 2019. Analysis on microphysical characteristics of three blizzard processes in Nanjing in the winter of 2018[J]. *Chin J Atmos Sci*, 43(5): 1095-1108(in Chinese).
- 梅海霞, 郭文刚, 周林义, 等, 2017. 雨滴谱谱形参数对梅雨降水模拟能力的影响[J]. *气象*, 43(1): 34-45. Mei H X, Guo W G, Zhou L Y, et al, 2017. Effect of shape parameter of raindrop spectrum on the simulation of Meiyu rainfall[J]. *Meteor Mon*, 43(1): 34-45 (in Chinese).
- 濮江平, 张伟, 姜爱军, 等, 2010. 利用激光降水粒子谱仪研究雨滴谱分布特性[J]. *气象科学*, 30(5): 701-707. Pu J P, Zhang W, Jiang A J, et al, 2010. Characteristics of Gamma raindrop size distribution based on the precipitation particle spectrometer[J]. *J Meteor Sci*, 30(5): 701-707(in Chinese).
- 沙修竹, 丁建芳, 程博, 2019. 地面激光雨滴谱仪反演降水参量的特性探究[J]. *气象*, 45(11): 1569-1578. Sha X Z, Ding J F, Cheng B, 2019. Characteristics of precipitation parameters reflected by ground laser raindrop disdrometer[J]. *Meteor Mon*, 45(11): 1569-1578(in Chinese).
- 苏立娟, 李汉超, 达布希拉图, 等, 2019. 呼和浩特地区降水雨滴谱特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 33(7): 122-127. Su L J, Li H C, Dabuxilatu, et al, 2019. Analysis on characteristics of rain spectrum in Hohhot Regions[J]. *J Arid Land Res Environ*, 33(7): 122-127(in Chinese).
- 杨长业, 舒小健, 高太长, 等, 2016. 基于雨强分级的夏季降水微物理特征分析[J]. *气象科技*, 44(2): 238-245. Yang C Y, Shu X J, Gao T C, et al, 2016. Microphysical features for summer rain based on rain intensity classification[J]. *Meteor Sci Technol*, 44(2): 238-245(in Chinese).
- 杨俊梅, 陈宝君, 韩永翔, 等, 2016. 山西省不同地区雨滴谱的统计特征[J]. *气象科学*, 36(1): 88-95. Yang J M, Chen B J, Han Y X, et al, 2016. Statistical characteristics of raindrop size distribution in different regions of Shanxi[J]. *J Meteor Sci*, 36(1): 88-95(in Chinese).
- 尹丽云, 李辰, 李红梅, 等, 2017. 滇中一次强降雨雪过程粒子谱特征分析[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 39(4): 598-608. Yin L Y, Li C, Li H M, et al, 2017. Analysis of characteristics of particle spectrum during the heavy rain-snow process in center of Yunnan Province[J]. *J Yunnan Univ (Nat Sci Ed)*, 39(4): 598-608(in Chinese).
- 张志杰, 王志楠, 2017. 呼和浩特市降水相态识别判据研究[J]. *内蒙古林业科技*, 43(1): 42-47. Zhang Z J, Wang Z N, 2017. Research on identification criterion of precipitation phase in Hohhot[J]. *J Inner Mongolia For Sci Technol*, 43(1): 42-47 (in Chinese).
- Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S, 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence[J]. *Rev Geophys*, 11(1): 1-35.
- Boudala F S, Isaac G A, Rasmussen R, et al, 2014. Comparisons of snowfall measurements in complex terrain made during the 2010 Winter Olympics in Vancouver[J]. *Pure Appl Geophys*, 171(1/2): 113-127.
- Edward A B, Kyoko I, Zhang G F, et al, 2006. A statistical and physical description of hydrometeor distributions in Colorado snowstorms using a video disdrometer[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 46(5): 634-650.
- Niu S J, Jia X C, Sang J R, et al, 2010. Distributions of raindrop sizes and fall velocities in a semiarid plateau climate: convective versus stratiform rains[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 49(4): 632-645.
- Tang Q, Xiao H, Guo C W, et al, 2014. Characteristics of the raindrop size distributions and their retrieved polarimetric radar parameters in northern and southern China[J]. *Atmos Res*, 135/136: 59-75.
- von Lerber A, Moisseev D, Bliven L F, et al, 2017. Microphysical properties of snow and their link to Ze-S relations during BAECC 2014[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 56(6): 1561-1582.
- Yuter S E, Kingsmill D E, Nance L B, et al, 2006. Observations of precipitation size and fall speed characteristics within coexisting rain and wet snow[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 45(10): 1450-1464.
- Zhang G F, Vivekanandan J, Brandes E A, et al, 2003. The shape-slope relation in observed Gamma raindrop size distributions: statistical error or useful information? [J]. *J Atmos Ocean Technol*, 20(8): 1106-1119.