

黄兆楚,王朝晖,周学思,等.张家口地区一次长时间降雪过程的滴谱特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(5):70-77.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.05.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



张家口地区一次长时间降雪过程的 滴谱特征分析

黄兆楚¹,王朝晖^{1*},周学思¹,印佳楠²,孙啸申¹,彭敏¹,张晓瑞¹,杨文霞¹

(1.河北省人工影响天气办公室,河北 石家庄 050021;2.河北省气象技术装备中心,河北 石家庄 050021)

摘 要:利用 OTT Parsivel 激光雨滴谱仪和站点加密观测资料,分析 2019 年 11 月 29 日张家口地区一次长时间降雪天气过程开始、雪花、稳定强降雪、结束 4 个阶段的滴谱演变特征,结果表明:(1)降雪天气过程中微物理参量(降水强度 R 、数浓度 N_t 、雨水含量 W 、雷达反射率因子 Z 、质量加权平均直径 D_m)演变趋势基本相同,其中开始阶段、稳定强降雪阶段、结束阶段的降水强度、雨水含量、雷达反射率因子受粒子数浓度影响较大,而雪花阶段降水强度、雨水含量、雷达反射率因子受粒子直径影响较大。(2)稳定强降雪阶段,粒子数浓度 N_t 量级为 $10^3 \sim 10^4$ 个/ m^3 ,而 $D_m < 1$ mm,这是由于大雪片在温度较低的情况下,下落过程中破碎形成大量小雪片。降雪过程中,雪滴下落速度 < 2 m/s 的粒子数占总粒子数的 90%,强降雪阶段的雪滴下落速度集中于 1~1.5 m/s。(3)在降雪过程中,最小二乘法拟合效果优于二、三、四阶矩方法。

关键词:OTT 激光雨滴谱仪;雪滴谱;下落速度;Gamma 分布

中图分类号:P426.63

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2022)05-0070-08

雨滴谱是雨滴数浓度随雨滴尺度变化的函数,即单位空间体积内雨滴数量随雨滴大小的分布,包含了丰富的降雨信息,在反映降雨类型、降雨强度等宏观特征的同时,也能反映雨滴群的微物理特性。张家口地区作为 2022 年冬奥会的主办地之一,通过深入分析该地区长时间降雪过程中粒子微物理特征和降雪谱分布、速度谱等滴谱特征,可以更清楚地认识降雪的发展和演变,揭示云中降雪机制。此外,能为数值模式预报中降雪微物理参数选取、降雪过程预报、冬奥会人工增雪等提供一定理论依据。

Marshall 等^[1]最早提出了雨滴谱的分布呈现指

数型,即 M-P 分布,可以描述大多数的降水粒子谱分布,但在弱降水的小滴阶段拟合效果较差。Ulbrich 等^[2]提出使用 3 参数的 Gamma 分布能更准确描述实际降水的雨滴谱分布。Gunn 等^[3]提出可用 Gamma 分布函数来描述雪滴谱,发现雪花等效融化直径与对应数浓度基本满足 Gamma 分布。宫福久等^[4]、陈宝君等^[5]通过研究我国各地的雨滴谱谱型及影响谱型的参数、峰值等问题,指出在不同降水类型下不同的雨滴谱分布拟合方法,计算得出的降水微物理特征参量存在差异,因此研究雨滴谱分布拟合方法具有重要意义。求取 Gamma 分布参数需要 3 个矩量,矩量的选择会对拟合效果产生一定影响,郑娇恒等^[6]使用不同的矩量组合估算并评估了 Gamma 拟合结果,认为采用中间阶矩计算的谱参数效果更好。对于冬季降水,有学者利用 OTT Parsivel 激光雨滴谱仪等获取的滴谱资料分析降雪过程的微物理变化。蒋年冲等^[7]利用安徽大别山一次强雨雪天气的 Parsivel 激光雨滴谱仪资料,分析该天气过程中毛毛雨、雨、

收稿日期:2021-06-07;修回日期:2022-03-31

基金项目:河北省重点研发计划项目(20375402D);河北省气象与生态环境重点实验室开放研究基金(Z202003Z)

作者简介:黄兆楚(1992—),女,助理工程师,主要从事大气物理方向研究。E-mail:hzc323126@126.com

通信作者:王朝晖(1994—),男,助理工程师,主要从事云物理研究。E-mail:wch13130911515@126.com

雨夹雪、雪和冻雨的平均谱分布特征,发现降雪粒子的粒子谱最宽。李德俊等^[8-9]利用 Thies Clima 激光雨滴谱仪(TCLPM)和站点加密观测资料,对 2011 年 2 月 12 日发生在武汉的一次短时暴雪天气过程的演变特征进行了研究,指出降雨、雨夹雪和纯雪 3 种降水相态对应不同的滴谱特征。黄钦等^[10]利用 Parsivel 激光雨滴谱仪和自动气象站观测资料及 MICAPS 数据,研究了 2014 年 2 月 7—15 日庐山地区 2 次持续时间>5 h 的冻雨过程的降水谱分布特征及下落末速度粒径分布,得到了冻雨、干雪和冰粒的下落末速度粒径关系和粒子谱宽。胡云涛等^[11]分析 2014—2016 年南京 6 次降雪过程的雪花谱资料,对滴谱进行了拟合,并讨论了 Gamma 分布系数的关系,发现南京地区降雪尺度谱分布更接近于 Gamma 分布,且小雪、中雪粒子的下落末速度同粒子直径变化无较大关联。李遥等^[12]通过分析 2018 年冬季南京 3 次暴雪过程,指出雪花谱基本呈多峰分布,降雪强度增大时对应小雪花向大雪花转化或雪花数浓度增大,且 Gamma 分布在各阶段的拟合优度均高于 M-P 分布拟合。

以往对降雪天气的研究和探索主要集中在不同相态的谱分布对比,但利用激光雨滴谱仪对长时间降雪天气过程中滴谱演变及微物理参数分析的研究还不太多。本文利用 OTT Parsivel 激光雨滴谱仪和站点加密观测资料,对张家口地区 2019 年 11 月 29 日一次长时间降雪天气过程进行了粒径谱和速度谱的分析,深入分析了长时间降雪过程中的降水微物理特征,为降雪天气粒子特征分析提供一定的理论参考。

1 数据和方法

1.1 仪器

以德国 OTT 公司的 Parsivel 激光谱仪为代表的新一代激光雨滴谱仪,既能测量下落过程中的粒子直径,同时也能获取粒子下落速度^[13]。其测量原理是以传感器发射的激光束为采样区间,没有降水粒子进入时,接收器接收到最大输入电压值;当有降水粒子进入激光束时输入电压值便发生变化。通过电压变化的大小来计算粒子直径的大小,同时记录粒子进入和离开激光束的时间,进而计算粒子的下落速度。滴谱仪取样面积 5 400 mm²,液体粒子的直径范围为 0.2~5 mm,固体粒子的直径范围为 0.2~25 mm^[14-16]。称重式雨量计利用电子秤称出容器内收集的降水重量,然后换算为降雨量,它的传感器灵敏

度很高(分辨率为 0.1 mm),可以较好地记录雪、冰雹及雨雪混合降水^[17]。

本文基于布设在河北省张家口市尚义县 OTT Parsivel 激光雨滴谱仪和国家基本雨量自动站分钟雨量数据进行分析。OTT Parsivel 与称重式雨量计均位于尚义观测站(114°E,41°N,海拔 1 376.5 m)。观测时间是 2019 年 11 月 29—30 日,雨滴谱采样间隔时间为 1 min,称重式雨量计采样间隔时间为 5 min。

1.2 处理方法

OTT Parsivel 激光雨滴谱仪受到设备本身硬件限制和观测环境影响,观测数据会出现粒径很小但速度很高的边缘效应,粒径较大但速度偏低的风和溅散效应^[18],从而对降水微物理特征参量产生影响。参照 CHEN Baojun 等^[19-20],对原始观测数据进行质量控制:对于粒子数 $N<10$ 个和雨强 $R<0.1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的样本(多是仪器噪声导致)予以剔除;根据粒子直径 D 与粒子下落最大速度 V 的经验关系曲线 $V(D)=9.65-10.3 \exp(-0.6D)$ ^[21],将观测速度值偏离经验曲线计算值 60%的数据进行剔除。OTT Parsivel 激光雨滴谱仪雨滴谱数据分为 32 级直径通道 D_i ($i=1\sim 32$)和 32 级速度通道 V_j ($j=1\sim 32$),每分钟观测数据有 $32\times 32=1\ 024$ 个^[22],存储的粒子谱数据是每一次采样时粒子在 D_i 和 V_j 组成的二维场中对应的粒子数。因为 Parsivel 记录的粒子个数是相对于采样面而言的,所以需要先订正为单位体积中的粒子个数,同时由于前两个尺度档的信噪比较低,因此数据选取从第 3 档开始^[23]。

本文用到的滴谱的微物理特征量计算公式见式(1)~(6)。

单位体积内第 i 级直径通道对应的粒子数:

$$N(D_i)=\frac{1}{S\cdot T}\sum_{j=1}^{32}\frac{n_{ji}}{V_j} \quad (1)$$

式中, $N(D_i)$ 是单位体积第 i 级直径通道对应的降水粒子数; V_j 是第 j 级速度通道对应的降水粒子速度; S 和 T 是雨滴谱仪的采样面积(单位:m²)和采样时间(单位:s)。

$$\text{数浓度: } N_t=\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D)dD \quad (2)$$

$$\text{降水强度: } R=\frac{\pi}{6}\rho_w\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D)D^3V(D)dD \quad (3)$$

$$\text{雨水含量: } W=\frac{\pi}{6}\rho_w\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D)D^3dD \quad (4)$$

$$\text{雷达反射率因子: } Z=\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D)D^6dD \quad (5)$$

$$\text{质量加权平均直径: } D_m = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) D^4 dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) D^3 dD} \quad (6)$$

式中, D 是等效直径, 单位为 mm; $N(D)$ 是单位空间体积、单位尺度间隔的雨滴数浓度, 单位为 $\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$; ρ_w 是水的密度, 单位为 g/m^3 ; V 是下落速度, 单位为 m/s 。

2 结果与讨论

2.1 天气概况

11月29日14时—11月30日01时, 张家口大部分地区出现中到大雪, 分析14时500、700 hPa高空天气形势(图1), 张家口尚义等地受高空槽缓慢东移影响, 配合中低层700 hPa切变过境, 500 hPa及以下的相对湿度均在90%以上, 湿区较为深厚, 降水过程中动力及水汽条件较好。地面场受地面低压控制, 有利于低层辐合, 降雪过程在14时前后开始, 整层系统配置为明显后倾结构, 降雪形势较为稳定。

国家基本站称重式雨量计采样时间分辨率为5 min, 为了与国家基本站雨量计对比, 将11月29

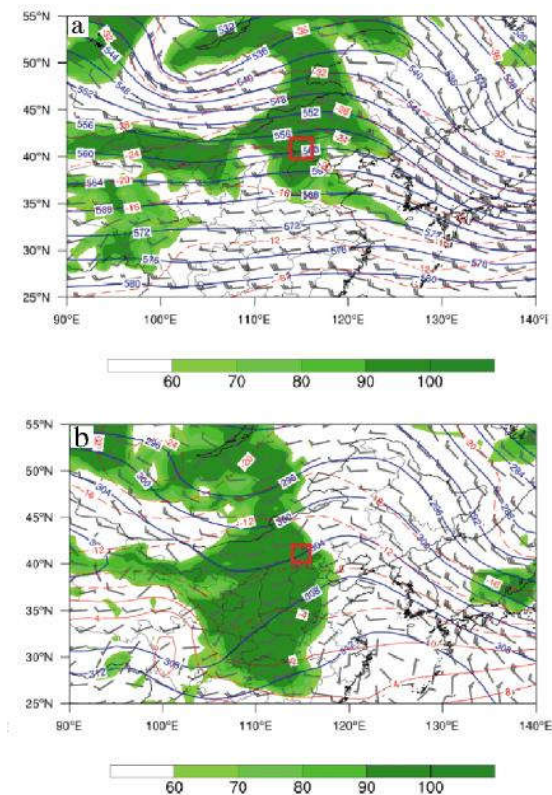


图1 2019年11月29日14时500 hPa(a)和700 hPa(b)高度场(蓝色实线)、温度场(红色线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、风场(风羽, 单位: m/s)、相对湿度(填色图, 单位: $\%$)

日张家口尚义站雨滴谱资料质量控制后, 计算得到30 min降水量, 与同一观测站内的国家基本站30 min降水量数据进行对比(图2)发现, 雨量计和OTT Parsivel相关性较好, 相关系数 $R=0.911$, 此次过程中, 雨滴谱30 min累计降水量最大达0.74 mm, 雨量计30 min累计降水量最大为0.8 mm, 此次强降雪的观测值是可信的。吴宜等^[24]通过整理2015年1月—2018年1月激光雨滴谱仪、称重式雨量计对降雪的测量结果, 发现激光雨滴谱仪和称重式雨量计的相关系数较高, 达到83.9%, 说明激光雨滴谱仪能够较为准确地反映降雪变化情况。

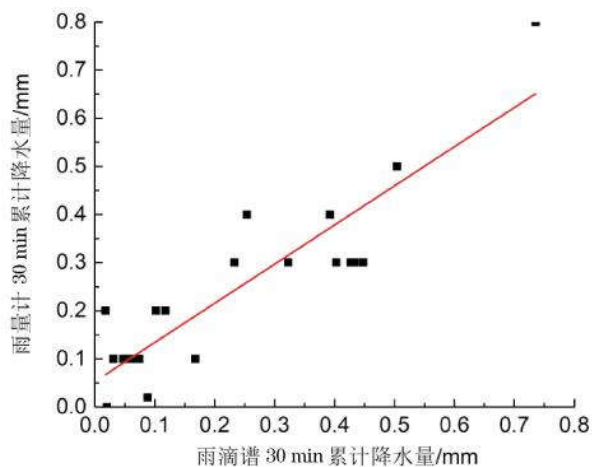


图2 2019年11月29日张家口地区降雪过程雨量计和OTT Parsivel雨滴谱对比

2.2 降雪过程参量分析

微物理特征参量可以反映出降雪的一些基本特性。本文在整个降雪过程中选取4个典型时间段进行研究(选取时间段为1 h), 其中, 降雪开始和结束, 指本次降雪过程开始发展和最终消散的两个阶段; 雪花阶段指粒子碰并聚合为雪花, 表现为质量加权平均直径明显增大的阶段; 稳定强降雪阶段指降雪系统稳定发展阶段, 表现为该阶段雨滴数浓度、雷达反射率因子和质量加权平均直径变化平缓。

图3给出了此次降雪过程中各微物理特征参量随时间的演变趋势。此次降雪天气过程中粒子数浓度 N_t 、降水强度 R 、雨水含量 W 、雷达反射率因子 Z 和质量加权平均直径 D_m 之间呈明显的正相关。开始阶段, 粒子数浓度在 $10^2 \sim 10^4$ 个/ m^3 , 由 N_t 和 R 的对比可以看出, 数浓度大的时候雪强更强; 雪花阶段, 粒子数浓度明显减少, 在 $10 \sim 10^3$ 个/ m^3 , 值得注意的是, 随着粒子数浓度的减少, 其他微物理参量甚至有增大的趋势, 初步判断可能是因为 D_m 在雪花阶

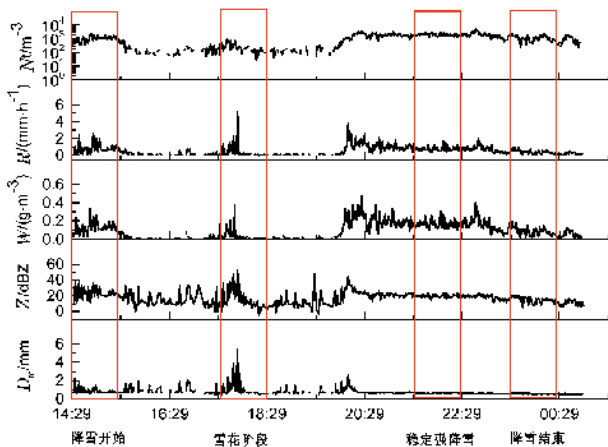


图3 2019年11月29日张家口地区降雪过程各微物理特征参量变化

段明显增大,降水强度、雨水含量、雷达反射率因子不仅受粒子数浓度的影响,受粒子直径的影响更显著;稳定强降雪阶段和结束阶段与开始阶段类似,粒子数浓度变化平缓,在 $10^2\sim 10^3$ 个/ m^3 ,降水强度、雨水含量、雷达反射率因子和质量加权平均直径的演变趋势与粒子数浓度的变化趋势一致。雷达反射率因子 Z 相对于其他参数来说波动更明显,在20~40 dBZ波动。郝建萍等^[25]认为降雪量的多少与强回波持续时间有关,且中等强度以上的降雪有一定范围的35 dBZ的强回波中心,本次降雪强度较大也印证了这一点。降雪结束阶段各参数均有一定程度的减小,

降雪在01时左右结束。

表1是4个降雪时间段的微物理参量和特征直径。降雪开始阶段和雪花阶段特征直径(算术平均直径 D ,质量加权平均直径 D_m ,最大直径 $D_{\max}$)大于其他2个阶段,雪花阶段特征直径最大, $D_{\max}$ 达7.5 mm。稳定强降雪阶段的粒子数浓度最大,达到1 773.16个/ m^3 ,而雪花阶段的粒子数浓度小于其他3个阶段,仅有213.04个/ m^3 ,雪花阶段 D_m 最大达到5.03 mm,稳定强降雪阶段 D_m 平均值、最大值均 <1 mm,是大雪片在温度较低的情况下,下落过程中破碎为大量小雪片,形成直径较小的雪晶。

2.3 粒径谱和速度谱分析

OTT Parsivel 激光雨滴谱仪能够获取高时空分辨率的粒子谱观测资料,通过粒子谱随时间的连续变化可以发现降雪过程中的微物理特征演变。图4给出了整个降雪过程中的粒子粒径谱和速度谱随时间的演变分布情况。

从粒径谱(图4a)可知,降雪发展初期,粒子谱变宽,粒子数浓度也不断增加,特别是直径在0.5 mm的粒子数浓度增长速度很快,雪花阶段粒子直径达到最大值7.5 mm。稳定强降雪阶段前,粒子直径达到4 mm,进入强降雪阶段后,粒子直径迅速减小,小粒子数激增,这是由于大粒子破碎造成的。从速度谱(图4b)中可知,降雪开始和雪花阶段,速度谱变化明显,下落速度在0.5~6 m/s,稳定强降雪和

表1 2019年11月29日张家口地区降雪过程微物理参量及特征直径

时间		微物理参量			特征直径		
		$N_t/(\text{个}/\text{m}^3)$	$W/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$R/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	D/mm	D_m/mm	$D_{\max}/\text{mm}$
14:29—15:29(降雪开始)	平均值	1 077.95	0.12	0.72	0.53	0.81	1.77
	最小值	356.40	0.03	0.11	0.47	0.55	0.94
	最大值	2 337.30	0.33	2.54	0.56	2.33	4.75
17:29—18:29(雪花阶段)	平均值	213.04	0.03	0.24	0.68	0.85	1.47
	最小值	25.20	0.00	0.01	0.42	0.47	0.69
	最大值	934.20	0.24	3.32	0.56	5.03	7.50
21:29—22:29(稳定强降雪)	平均值	1 773.16	0.15	0.71	0.51	0.61	1.23
	最小值	1 120.20	0.08	0.36	0.47	0.52	0.81
	最大值	2 914.20	0.28	1.53	0.55	0.68	1.38
23:29—00:29(降雪结束)	平均值	962.31	0.07	0.31	0.48	0.54	0.87
	最小值	142.90	0.01	0.02	0.42	0.43	0.44
	最大值	2 040.80	0.17	0.87	0.54	0.65	1.38

降雪结束阶段的粒子下落速度减小并维持在 1~1.5 m/s, 速度谱宽变化不明显, 与周黎明等^[26]观测 2009 年初冬山东一次暴雪过程中, 下落末速度多为 0.375~2 m/s, 数浓度峰值速度区在 0.5~1.5 m/s 基本相同。

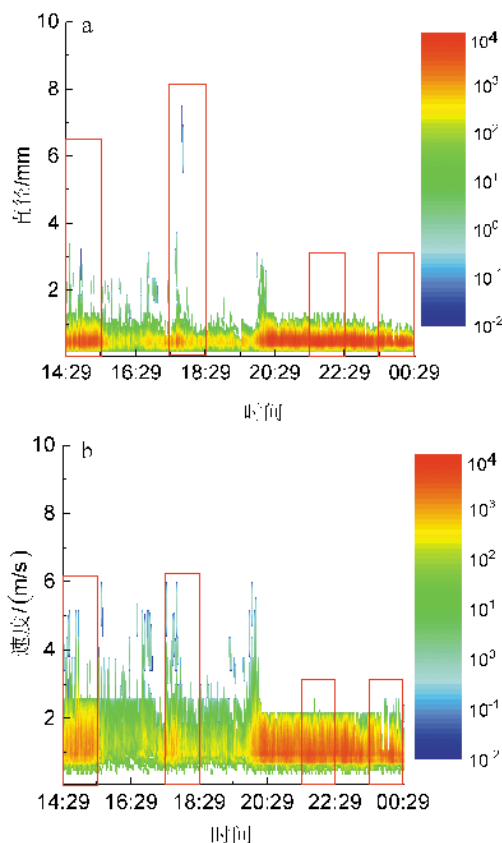


图4 降雪过程粒子谱(a)速度谱(b)填色分布
(a为粒子数浓度填色,b为速度谱密度填色,红色框依次代表降雪开始阶段、雪花阶段、稳定强降雪阶段、结束阶段)

图5给出了降雪过程中不同阶段的滴谱分布。各阶段均呈单峰分布, 降雪开始阶段雪滴谱谱宽 5 mm, 雪花阶段过程雪滴谱最宽达到 8 mm, 但其对应的粒子数浓度最小, 稳定强降雪阶段雪滴谱谱宽缩短至 1.5 mm, 但粒子数浓度明显增加, 降雪结束阶段与稳定强降雪阶段谱宽基本相同, 但粒子数浓度较稳定强降雪阶段更小。

降水粒子的下落速度决定了降水粒子的动能, 是降水最重要的微物理量之一。粒子落速和直径的关系同时也是多普勒天气雷达和风廓线雷达反演粒子谱的基础, 并且是云参数化方案的重要组成部分^[27]。由图6可知, 雪花阶段的粒子数浓度明显少于其他3个阶段, 但粒子直径较其他阶段更大, 粒径在 0~1 mm 时, 随着粒径的增大, 粒子速度减小, 当直

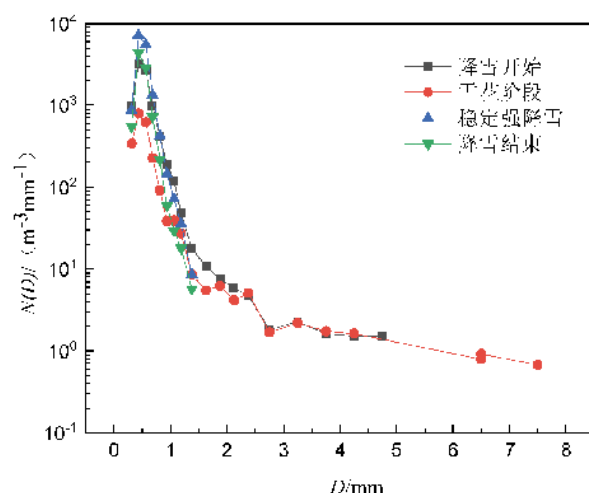


图5 2019年11月29日张家口地区降雪过程
不同阶段雪滴谱分布

径>1 mm 时, 粒子速度基本稳定在 0.5~2 m/s。强降雪阶段和降雪结束阶段的最大粒子直径小于降雪开始阶段和雪花阶段的最大粒子直径; 相较于降雪开始和雪花阶段, 强降雪阶段和降雪结束阶段的下落末速度较小, 雪粒子下落速度<2 m/s 的粒子数约占总粒子数的 90%, 且雪粒子的下落速度和雪花粒子直径无明显关系。胡云涛等^[10]统计了 2014—2016 年南京地区降雪过程的速度谱, 发现小雪和中雪粒子下落速度同粒子直径变化并无较大关联, 与张家口此次长时间降雪过程情况相同。本次过程中, 对雪粒子下落速度影响较大的是环境温度和湍流扰动, 这二者进一步抵消了直径增大对于粒子下落速度的影响。

2.4 雪滴谱 Gamma 拟合

图7是对应4个典型时间段的平均滴谱。Gamma 分布同样适用于雪滴谱分布。非线性最小二乘法拟合在大滴端和小滴端的拟合效果较好, 拟合曲线与真实雪滴谱浓度分布较为一致。虽然阶矩法的各阶矩量与雨滴谱参数存在对应关系, 但拟合效果低于非线性最小二乘法。在降雪初期和雪花阶段, 二、三、四阶矩拟合对<3.5 mm 的粒子区存在高估, 对>3.5 mm 的粒子区存在低估; 最小二乘法在强降雪阶段和降雪结束阶段, 对高粒子浓度数有低估, 由于此次降雪过程的粒子直径主要在小滴端, 因此二、三、四阶矩对整体降雪拟合是高估的。霍朝阳等^[28]研究认为, 阶矩法对雨滴谱浓度分布的描述误差原因是, 阶矩法的实质是通过矩量使得雨滴谱浓度分布拟合模式化, 并不能准确代表真实的降水雨滴谱状况。

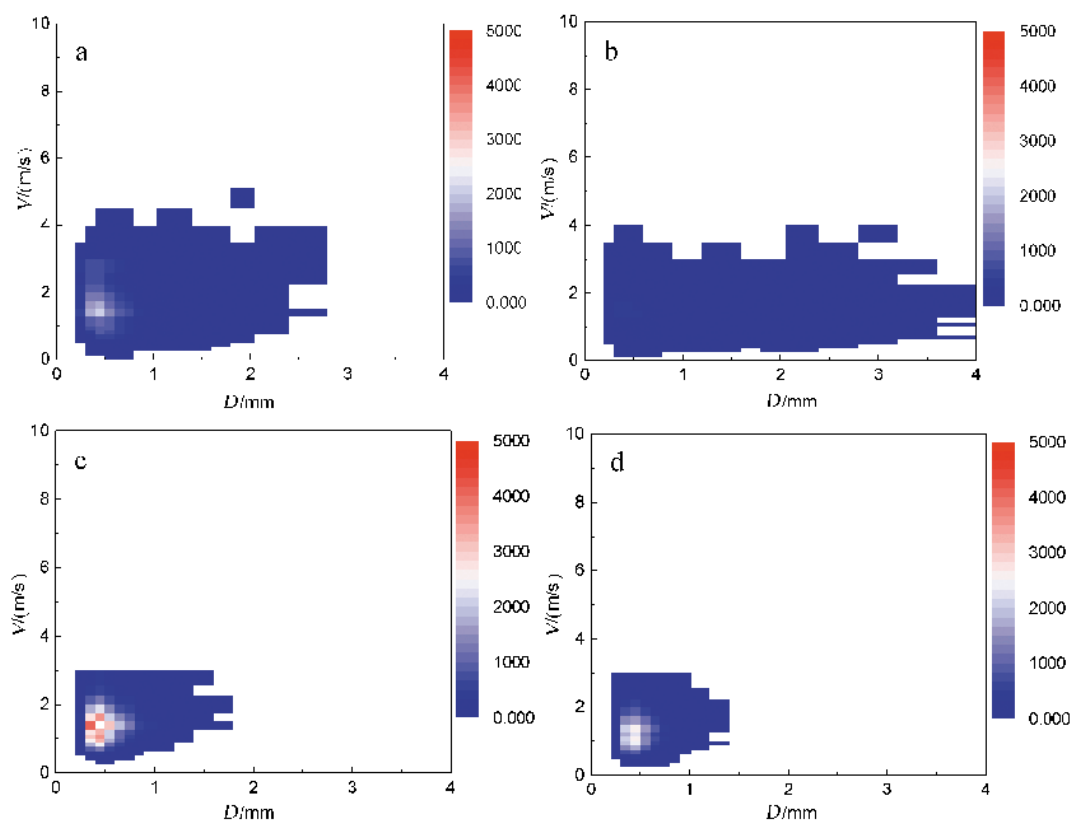


图 6 降雪粒子下落末速度粒子个数(填色)分布
(a 为降雪开始阶段,b 为雪花阶段,c 为稳定强降雪阶段,d 为降雪结束阶段)

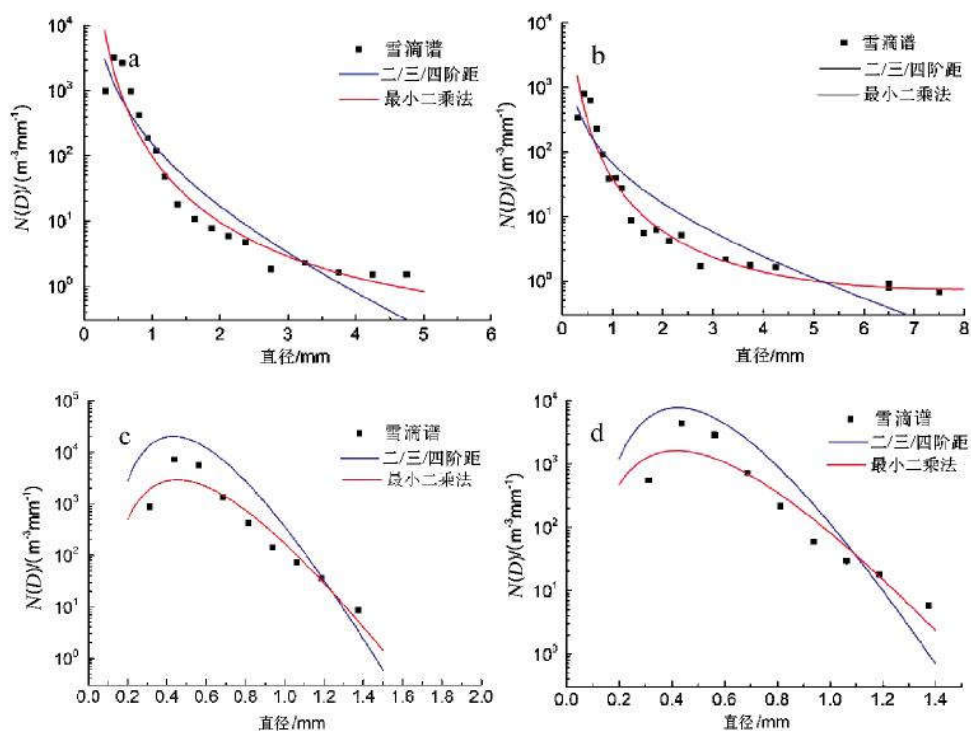


图 7 2019 年 11 月 29 日张家口地区降雪过程 4 个典型时段滴谱分布及 Gamma 拟合
(a 为降雪开始阶段,b 为雪花阶段,c 为稳定强降雪阶段,d 为降雪结束阶段)

3 结论

选取2019年11月29日发生在张家口地区的长时间降雪天气过程,利用OTT Parsivel激光雨滴谱仪和站点加密观测资料,对滴谱演变特征进行了初步分析,得出结论如下:

(1)雨滴谱资料质量控制后,计算得到30 min降水量,与同一观测站内的国家基本站30 min降水量数据进行对比,称重式雨量计与激光雨滴谱仪计算得到的累积降雪量较为一致,相关系数为0.911,说明激光雨滴谱仪能够准确地反映降雪变化情况。

(2)降雪天气过程中微物理参量(降水强度 R 、数浓度 N_t 、雨水含量 W 、雷达反射率因子 Z 、质量加权平均直径 D_m)演变趋势基本相同,降雪开始、稳定强降雪阶段、降雪结束阶段的降水强度、雨水含量、雷达反射率因子受粒子数浓度的影响较大,而雪花阶段降水强度、雨水含量、雷达反射率因子受粒子直径影响较大。

(3)稳定强降雪阶段前,粒子直径较大,进入强降雪阶段后,粒子直径迅速减小($D_m < 1\text{ mm}$),小粒子数激增(N_t 量级为 $10^3 \sim 10^4$ 个 $\cdot\text{m}^{-3}$),考虑是由于温度较低的情况下,大雪片在下落过程中破碎形成大量小雪片,从而形成直径较小的雪晶。降雪过程中,雪滴下落速度 $< 2\text{ m/s}$ 的粒子数占总粒子数的90%,强降雪阶段的雪滴下落速度在 $1 \sim 1.5\text{ m/s}$ 。

(4)分别使用二、三、四阶矩和非线性最小二乘法对实际雪滴谱各个阶段进行Gamma分布拟合。结果表明,Gamma分布同样适用于雪滴谱分布,非线性最小二乘法拟合方法在降雪过程中拟合效果优于二、三、四阶矩拟合。

参考文献:

- [1] MARSHALL J S, PALMER W M K. The distribution of raindrops with size [J]. *Journal of Meteorology*, 1948, 5 (4): 165–166.
- [2] ULBRICH C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1983, 22(10): 775.
- [6] 郑娇恒, 陈宝君. 雨滴谱分布函数的选择: M-P 和 Gamma 分布的对比研究[J]. *气象科学*, 2007, 27(1): 17–25.
- [7] 蒋年冲, 胡雯, 邵洋, 等. 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*, 2010, 36(6): 79–84.
- [8] 李德俊, 熊守权, 柳草, 等. 武汉一次短时暴雪过程的地面雨滴谱特征分析[J]. *暴雨灾害*, 2013, 32(2): 188–192.
- [9] 李德俊, 唐仁茂, 向玉春, 等. 基于多种探测资料对武汉一次短时暴雪天气的监测分析[J]. *高原气象*, 2012, 31(5): 1386–1392.
- [10] 黄钦, 牛生杰, 吕晶晶, 等. 庐山一次积冰天气过程冻雨滴谱及下落末速度物理特征个例研究 [J]. *大气科学*, 2018, 42(5): 1023–1037.
- [11] 胡云涛, 高太长, 曾培培, 等. 2014–2016 年南京地区降雪微物理特征[J]. *气象与减灾研究*, 2017, 40(2): 107–110.
- [12] 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.
- [13] 李淘, 阮征, 葛润生, 等. 激光雨滴谱仪测速误差对雨滴谱分布的影响[J]. *应用气象学报*, 2016, 27(1): 25–34.
- [14] LOFFLER-MANG M, JOSS J. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2000, 17(2): 130–139.
- [15] 濮江平, 张伟, 姜爱军, 等. 利用激光降水粒子谱仪研究雨滴谱分布特性[J]. *气象科学*, 2010, 30(5): 701–707.
- [16] 濮江平, 赵国强, 蔡定军, 等. Parsivel 激光降水粒子谱仪及其在气象领域的应用 [J]. *气象与环境科学*, 2007, 30 (2): 3–8.
- [17] 丁建芳, 刘磊, 程博, 等. 河南省层状云降水雨滴谱特征分析[J]. *气象与环境科学*, 2022, 45(1): 55–64.
- [18] YUTER S E, KINGSMILL D E, NANCE L B, et al. Observations of precipitation size and fall speed characteristics within coexisting rain and wet snow [J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2006, 45 (10): 1450–1464.
- [19] CHEN Baojun, WANG Junjun, GONG Dianli. Raindrop size distribution in a midlatitude continental squall line measured by Thies optical disdrometers over East China [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2016, 55(3): 621–634.
- [20] CHEN Baojun, HU Zhiquan, LIU Liping, et al. Raindrop size distribution measurements at 4,500m on the Tibetan Plateau during TIPEX –III [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017: 122.
- [21] ZHANG Guifu, VIVEKANANDAN, BRANDES, et al. The shape –slope relation in observed Gamma raindrop size distributions: statistical error or useful information? [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2003, 20 (8): 1106–1119.
- [22] Battaglia A, Rustemeier E, Tokay A, et al. PARSIVEL snow observations: a critical assessment [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2010, 27(2): 333–344.
- [23] 陈子健, 胡向峰, 陈宝君, 等. 河北省中南部暴雨雨滴谱特征[J]. *干旱气象*, 2019, 37(4): 586–596.
- [24] 吴宜, 刘西川, 张军, 等. Parsivel 激光雨滴谱仪与雨量计

- 观测降水的一致性分析[J].气象科技,2020,48(2):3-9.
- [25] 郝建萍,赵桂香,袁怀亭.多普勒雷达资料在强降雪过程中的分析应用[J].山西气象,2006,76(3):3-4.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 霍朝阳,阮征,魏鸣,等.雨滴谱 Gamma 函数拟合方法的分析与评估[J].科学技术与工程,2018,18(34):1-10.

Characteristics of Particle Size Distribution During a Snowstorm in Zhangjiakou

HUANG Zhaochu¹, WANG Chaohui¹, ZHOU Xuesi¹, YIN Jianan², SUN Xiaoshen¹,
PENG Min¹, ZHANG Xiaorui¹, YANG Wenxia¹

(1.Weather Modification Office of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China;

2.Meteorological Technology Equipment Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract A snowstorm was well recorded on November 29, 2019 in Zhangjiakou and the snow drop spectrum characteristics of this weather was analyzed based on OTT Parsivel (Particle Size and Velocity Spectrometer) data and intensive observations. This snowstorm was categorized into four stages, including the beginning stage, snowflake stage, stable snowfall stage and the ending stage. The results are as follows: (1) In general, the evolution trend for all microphysical parameters (rainfall intensity R , number concentration N_t , rainfall content W , radar reflectivity factor Z , mass weighted average diameter D_m) is nearly identical during the whole snowfall process. In the snowflake stage, precipitation intensity, rainfall content and radar reflectivity factor are all greatly affected by particle number concentration. However, in the rest snowfall process, the particle diameter takes the responsibility for those changes above. (2) During the stable heavy snowfall stage, the particle number concentration (N_t) varies from 10^3 to 10^4 , but the D_m is less than 1 mm, which may be caused by the shattering of falling large snowflakes under the circumstance of low temperature. In the process of snowfall, 90% particles were falling at a rate of less than 2 m/s, while at the stable snowfall stage the falling velocity of snow particles was mostly ranging around 1–1.5 m/s. (3) The second, third, fourth moment and the least square method were both used to fit the Gamma distribution of the particle spectrum distribution in different snowfall stages. In the process of snowfall, the least square method has better fitting results than the second, third, fourth moment.

Key words OTT Parsivel; snow drop spectrum; falling velocity; Gamma distribution