

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2020.11.015

重庆地区一次雨转雪过程微物理特征分析

张逸轩¹, 廖向花¹, 张丰伟²

1. 重庆市人工影响天气办公室, 重庆 401147; 2. 甘肃省人工影响天气办公室, 兰州 730030

摘要: 为了研究重庆地区雨转雪天气过程降水微物理特征, 利用布设在重庆西部沙坪坝区气象站的一部 MRR (Micro-rain Radar) 微雨雷达及一台 OTT Parsivel2 雨滴谱仪探测到的 2016 年 1 月 22—24 日的雨转雪天气过程的垂直方向上的滴谱资料, 对此次雨转雪天气过程的粒子下落速度、雷达反射率、粒子谱等微物理特征进行了分析. 结果表明: 雨滴谱仪及微雨雷达能较好地应用于云下垂垂直方向上的降水研究; 此次过程, 液(固)态降水中粒子平均直径、谱分布等特征具有明显差异, 液态降水中表现为垂直下落方向上先减小后增大的特征, 粒子以碰并增长为主, 固态降水中垂直方向上各特征值则较为稳定; 受仪器观测原理影响, 雨转雪过程中粒子相态转变在微雨雷达观测特征量上表现为粒子下落速度均匀分布在 1 m/s 附近, 粒子数浓度急剧增加 1~2 量级, 回波反射率 Z 分布在 10 dBZ 附近.

关键词: 微雨雷达; 微物理特征; 雨转雪过程

中图分类号: P458

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2020)11-0128-13

低温雨雪特别是冬季降雪一直以来是政府和公众每年冬季最关心的灾害性天气之一, 一旦发生降雪, 极易对交通、电力、通讯、农作物等造成巨大损失. 重庆地处四川盆地边缘, 受大气环流、地理环境和特殊地形条件等因素影响, 气象灾害种类多, 发生频繁, 尤其是暴雨、连阴雨、雷暴、冰雹、大风等灾害^[1]. 近年来学者们主要针对西南地区强降水导致的灾害成因进行分析^[2-4], 对区域内降雪观测及研究相对较少. 国内学者对降雪的研究主要集中在数值模拟、天气学诊断等资料的分析, 如邓国卫等^[5]利用 ECWMF 再分析资料应用天气分析和诊断方法对 2011 年 3 月川西高原北部的暴雪天气过程进行了系统分析, 潘娅婷等^[6]利用 NCEP 资料和实况资料, 对 2013 年云南冬季的 4 次降雪过程进行了诊断分析, 周文钰等^[7]利用 NCEP 再分析资料, 着重讨论了贵州 2014 年一次强降雪过程中的物理量配置情况. 李鸾等^[8]利用安徽芜湖的风廓线雷达分析了 2012 年 12 月安徽的一次大雪天气过程, 讨论了降雪过程中的风廓线观测大气风场特征. 以上研究虽然取得了较多的研究成果, 但未对降雪天气过程的粒子微物理特征进行研究. 随着观测仪器的发展, 雨滴谱仪、微雨雷达逐渐应用于降水微物理过程及其特征的研究, 尹丽云等^[9]利用 OTT 雨滴谱仪对云南中部 2015 年 12 月的一次雨(雪)过程的粒子微物理参量演变特征进行了分析, 详细探讨了雨(雪)过程中地面粒子谱变化特征, 李德俊等^[10]、张治等^[11]也利用激光雨滴谱仪分析了发生在武汉、沈阳等地的雨雪天气过程中的粒子谱转换特征. 微雨雷达可监测到空中雨滴谱

收稿日期: 2019-05-26

基金项目: 中国气象局大气探测重点实验室项目(KLAS201705); 中国气象局云雾物理环境重点实验室开放课题项目(2017Z01605).

作者简介: 张逸轩(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事人工影响天气研究.

廓线的变化, 能较好应用于垂直方向上云下降水的研究. Cha 等^[12]利用微雨雷达分析了层型降水下的零度层亮带特征研究, Garcia-vila 等^[13]分析了对流性降水和层云降水的传播特性, 目前国内相关研究相对较少. 温龙等^[14]、王洪等^[15]利用探空、雨滴谱仪等评估了 MRR 的探测精度, 孙豪等^[16]利用 C 波段调频连续波雷达、ka 波段毫米波雷达、微雨雷达 3 种雷达探讨了散射对不同波长雷达回波的影响, 崔云扬等^[17]利用布设在河北邢台的 MRR 微雨雷达对 2016 年 5 月的一次层状云降水过程进行了研究, 探讨了此次降水过程的雨滴谱的垂直分布特征.

为详细了解重庆地区不同降水过程的降水微物理特征, 重庆市人工影响天气办公室在重庆市沙坪坝区气象观测站先后布设了微雨雷达、雨滴谱仪等仪器设备, 仪器设备布设位置一致, 不存在时空差异, 且全天候观测, 较好获得了 2016 年 1 月 22—24 日的雨转雪天气过程的垂直方向上的粒子谱资料. 本研究主要利用相关资料对此次雨转雪过程的宏、微观特征进行分析.

1 资料与方法

1.1 OTT Parsivel2 激光雨滴谱仪介绍

本研究使用的 Parsivel2 激光雨滴谱仪布设在重庆市沙坪坝气象站, 由德国 OTT 公司制造, 是一种现代化的以激光技术为基础的新型光学测量系统. 主要由激光发射器、接收器、控制运算单元、存储器等部分组成, 激光测量尺寸为 180 mm×30 mm, 可测量区域为 54 cm², 液态降水粒径测量范围为 0.2~8 mm, 固态降水粒径测量范围为 0.2~25 mm, 速度测量范围为 0.2~20 m/s, 根据粒径大小及速度可推测出毛毛雨、小雨/雨、雨、雨夹雪、雪、米雪、冻雨、冰雹等 8 种降水类型, 与气象观测员观测的降雨类型吻合度超过 97%, 因此能很好识别相应的天气现象. 仪器采样时间为 60 s, 粒子直径和速度都分为 32 档, 每 1 min 采样的粒子谱数据为 32×32=1 024 个, 由于粒子直径的前两档精度不够, 因此在使用时剔除, 对于液态粒子下落时的形变问题本版本仪器在设计时已考虑订正, 因此不再对液态降水粒子进行形变订正, 但对固态降水粒子还需要根据类别进行订正.

1.2 微雨雷达介绍

微雨雷达布设在沙坪坝气象站, 与激光雨滴谱仪同位置, 该仪器由德国 Metek 公司生产制造, 是一种小型的垂直指向雷达, 采用连续调频(FW-CW)技术, 通过雨滴的尺寸与雷达散射截面、雨滴的尺寸与下落速度之间的关系来判断降雨的状况及雨滴的大小分布, 工作频率为 24.230 GHz, 可用于观测降水的垂直结构. 本研究采用的微雨雷达探测数据垂直分辨率为 100 m, 共 30 层, 时间分辨率为 1 min, 粒子直径测量范围为 0.109~6 mm, 速度测量范围为 0~12.192 m/s, 速度分辨率为 0.190 5 m/s. 仪器提供雷达反射率因子 Z 、雨强 R 、液态水含量 LWC 、雨滴下落速度 W 等物理量, 主要物理量计算公式如下:

雷达反射率因子:

$$Z = \int_{i=1}^{64} N(D_i) D_i^6 dD \quad (1)$$

雨强:

$$R = \frac{6\pi}{10\ 000} \int_{i=1}^{64} V(D_i) N(D_i) D_i^3 dD \quad (2)$$

液态水含量:

$$LWC = \frac{\pi}{6\ 000} \int_{i=1}^{64} N(D_i) D_i^3 dD \quad (3)$$

雨滴平均直径:

$$D = \int_{i=1}^{64} N(D_i) D_i^4 dD / \int_{i=1}^{64} N(D_i) D_i^3 dD \quad (4)$$

雨滴总数浓度:

$$N_0 = \int_{i=1}^{64} N(D_i) dD \quad (5)$$

本研究主要针对 2016 年 1 月 22—24 日的一次雨转雪天气过程进行研究, 首先利用同站布设的自动站雨量、OTT 雨滴谱仪观测雨量, 验证微雨雷达对此次过程观测的可靠性, 然后通过 OTT 观测的天气现象把降水过程分为不同时段, 分析不同时段 MRR 雷达反射率、雨强值、雨滴下落速度、粒子平均直径、谱变化等来研究降水的垂直分布特征. 其中雨滴谱仪及 MRR 微雨雷达观测数据时间分辨率都为 1 min, 自动站雨量数据分辨率为 1 h.

2 降雪天气背景

2016 年 1 月 19 日夜间至 24 日, 重庆地区出现了一次明显的降温降雨(雪)天气过程. 19 日夜间至 22 日白天, 大部地区以间断小雨为主, 中部部分地区达中雨, 城口、巫溪、巫山、黔江、酉阳、秀山等地小雪到中雪, 酉阳有短暂冻雨; 22 日夜间至 24 日白天, 重庆市中西部和东南部先后出现降雪, 其中中西部普降中雪到大雪, 局地暴雪, 东南部小雪到中雪. 沙坪坝站地面雨滴谱仪在 23 日 01:21 观测到雨夹雪, 05:17 开始转为中小雪, 13:22 后转为零星小雪、雨夹雪、小雨混合等, 过程持续到 24 日 2:30 结束. 从雷达回波来看, 整个降雪时间段观测站点上空回波都在 25 dBZ 以内, 整个观测范围内无较强回波, 雨滴谱仪资料判断为稳定性降水. 天气形势分析可知, 此次重庆市大范围降雪过程产生的主要原因为东北冷涡西侧横槽转竖引导冷空气南下, 且过程前期中低层储备了较为充沛的水汽. 1 月 21 日 20 时, 500 hPa 蒙古东部有冷涡, 冷中心达 $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷涡底部有一横槽, 延伸至新疆中部, 青藏高原上有高原槽, 重庆地区受西风波动气流影响; 700 hPa 重庆长江沿线以北有偏东风与偏西风的切变, 水汽较为充沛, 比湿达到 4 g/kg ; 850 hPa 重庆地区为较弱的偏南风, 温度露点差较小, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度线位于四川南部—贵州中部—湖南中部. 1 月 23 日 08 时实况 500 hPa 上我国东北地区的冷涡中心略有南压, 横槽已经转竖, 引导冷空气南下, 南支槽压过重庆, 重庆受槽后西北气流控制. 850 hPa 受高压底部的偏东冷空气回流影响, 温度 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 线压至贵州中部地区, 同时在我市西部地区形成较强辐合, 有动力抬升作用, 且前期中低层储备了较为充沛的水汽, 有利于增大西部的降雪量. 截至 24 日, 中西部地区日平均气温下降了 $6\sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其余地区下降 $4\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 24 日夜间全市大部地区最低气温在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 城口最低为 $-9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3 MRR 与其他仪器观测数据对比

3.1 观测雨强对比

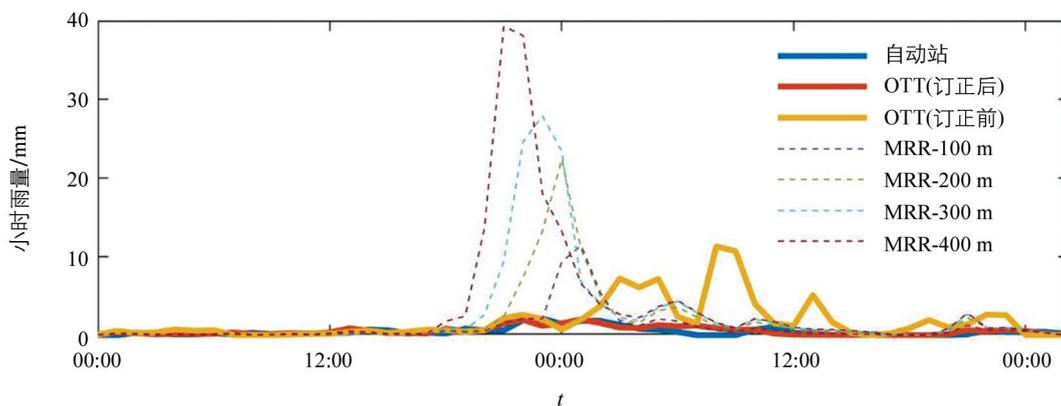
前人验证微雨雷达探测效果时, 通常选择微雨雷达近地面观测数据进行对比分析^[14, 18], 也有学者认为受地面湍流影响, 最底层观测数据不可靠, 选择更高层数据进行对比^[15]. 本研究将 1 月 22—24 日雨转雪过程 MRR 探测得到的 100, 200, 300, 400 m 高度雨量数据与同时期 OTT 雨滴谱仪、自动站观测数据进行对比. 表 1 为 3 类仪器观测雨量, 在此次雨转雪过程中各类仪器累积过程雨量有较大差异. 与王洪等^[15]、崔云扬^[19]研究不同, 此次过程, 微雨雷达观测雨量随着观测高度增加偏差越来越大, OTT 雨滴谱仪在未进行订正前偏差亦较大, 在进行雨雪订正后两者累积雨量较为接近. 图 1 给出了整个过程中 3 类仪器观测的小时雨量及分钟雨强. 可以看出, 整个过程中自动站观测小时雨量较小, 绝大多数时段小时雨量在 1 mm 以下, 最大小时雨量为 2.1 mm, 出现在 22 日 23 时. 以自动站

雨量为准作为参照, OTT 雨滴谱仪在开始降雪后雨量偏差较大, 对其进行雨雪订正后与自动站观测雨量较为接近, 偏差较小; 微雨雷达观测雨量与自动站偏差主要出现在地面出现降雪前, 且高度越高, 偏离越大, 出现偏差的时间越早, 在前期地面弱降水阶段和地面出现降雪阶段, 微雨雷达与自动站两者之间趋势变化等较为一致。

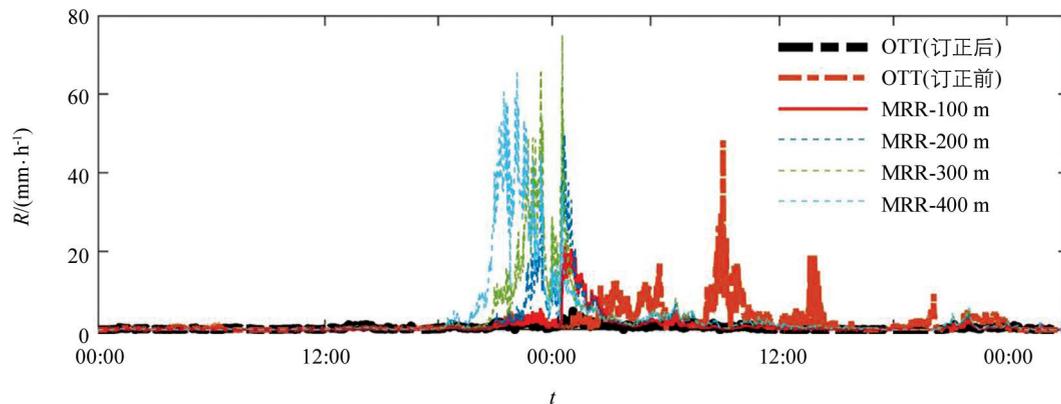
表 1 MRR、自动站、OTT 3 类仪器观测过程雨量

自动站	OTT(订正后)	OTT(订正前)	MRR_100m	MRR_200m	MRR_300m	MRR_400m
23.1	26.79	90.80	49.662 8	91.00	133.29	171.79

mm



a. 不同高度层微雨雷达、雨滴谱仪、自动站观测小时雨量随时间变化图



b. 不同高度层微雨雷达、雨滴谱仪观测分钟雨强随时间变化图

图 1 1 月 22 日 00:00—1 月 24 日 03:00 小时雨量及分钟雨强随时间变化图

3.2 雨滴谱及平均粒子直径对比

为进一步探讨仪器间观测结果的差异, 图 2 为 OTT 与 MRR 近地面(100 m)高度层观测的雨滴谱、平均直径随时间变化图。从图 2a 和图 2b 看出, 在降雪前, 对于 1 mm 以下的雨滴数浓度, 微雨雷达与雨滴谱仪观测较为一致, 1 mm 以上的雨滴数浓度雨滴谱仪观测较微雨雷达为多; 降雪开始后, 两者有较为明显的差异, 雨滴谱仪观测数浓度变化不大, 但粒子直径谱不断拓展, 而微雨雷达观测雨滴数浓度出现量级上的跃增, 比降雪前高 1~3 个量级, 粒子直径谱逐渐收窄, 随后趋于稳定。图 2c 为两种仪器观测的粒子平均直径变化图, 可以看出雨滴平均直径在降雪前后有明显分化。产生两者仪器观测差异的主要原因可能在于仪器观测原理的不同, 对粒子的观测中, 雨滴谱仪通过激光束来实测粒子的直径和速度, 微雨雷达则利用雨滴的大小与雷达散射截面、雨滴的大小与下落速度之间的关系来判断降雨的状况及雨滴大小分布, 仪器导出速度参量后再根据直径速度经验公式来导出直径 D , 此经验公式适用于液态降水。对于固态降水中的

雪花,其下落速度在 $1\sim 2\text{ m/s}$,根据经验公式,对应的粒子直径在 0.5 mm 以下,因此造成两者谱分布及粒子直径等特征出现差异.

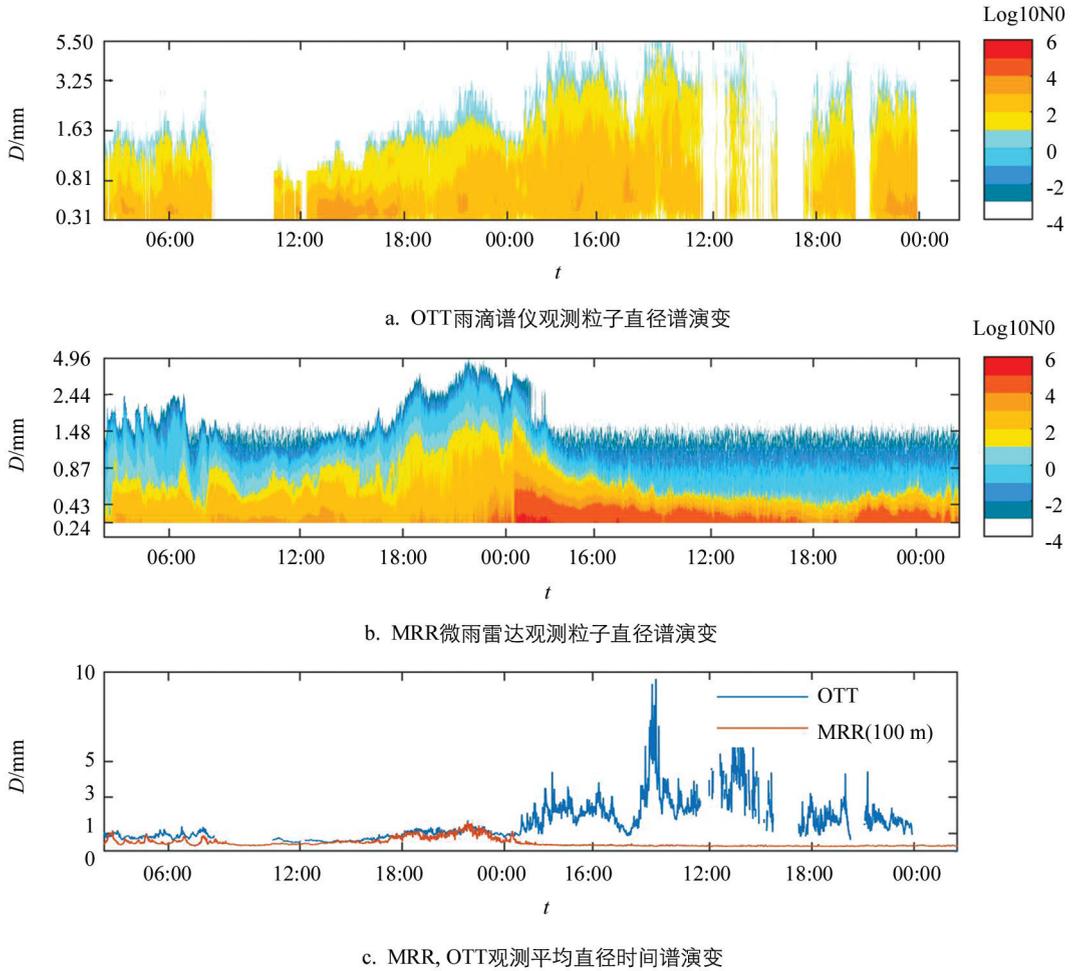


图 2 降水过程粒子直径谱及平均直径演变图

4 微雨雷达资料分析

4.1 MRR 观测物理量宏观分布特征

OTT Parsivel 雨滴谱仪能较好分辨出毛毛雨、小雨/雨、雨、雨夹雪、雪、米雪、冻雨、冰雹等 8 种降水类型,与气象观测员观测的降雨类型吻合度超过 97%,能很好地识别相应的天气现象.图 3d 给出了 2016 年 1 月 22 日 0:30 至 1 月 24 日 2:30 间各类天气现象时间演变分布,可以看出,此次天气过程大致可以分为如下 8 个不同阶段:毛毛雨(22 日 00:43—17:40,期间夹杂短暂的小雨)、小雨—中雨(22 日 17:41—23 日 1:12)、雨夹雪(23 日 1:13—5:16)、中雪阶段(23 日 5:17—10:12)、小雪阶段(23 日 10:13—13:22)、零星小雪(23 日 13:23—17:13)、间歇期(23 日 17:14—20:18)、过程末尾的中雪—小雪—雨夹雪—小雨混合阶段(23 日 20:18—24 日 2:30).图 3a~c 分别给出了微雨雷达观测的雷达回波反射率 Z 、液态水含量 LWC 、粒子下落速度 W 的随时间演变剖面图,可以看出,整个降水过程雷达回波反射率较低,最大回波反射率为 34 dBZ,在毛毛雨阶段回波垂直结构较为平稳,在 20 dBZ 以下,这一阶段空中液态水含量较低,在 0.1 g/m^3 以下,但从粒子的下落速度来看,粒子的下落速度分布变化较大,前期存在大于 4 m/s 的粒子;小—中雨阶段,空中回波反射率增强,同一阶段空中液态水含量也较大,大于 1 g/m^3 ,回波反射率及液态水含量两者形态较为一致,其高值区底部向下倾斜,逐渐接

地, 从粒子下落速度来看, 同时期液态水含量大值区底部以下粒子下落速度较大(液态水含量大值区粒子下落速度在 1~2 m/s); 雨夹雪阶段垂直方向上液态水含量仍然维持大于 1 g/m³, 回波反射率在 10~20 dBZ 之间, 粒子下落速度 1~2 m/s; 中雪阶段与雨夹雪阶段类似, 变化不大; 随着天气过程减弱, 到达小雪阶段, 液态水含量逐渐降低到 0.5 g/m³ 以下, 回波反射率逐渐下降到 10 dBZ 以下, 低层粒子下落速度仍维持 1~2 m/s, 高层出现大量大于 3 m/s 的降水粒子; 间歇期地面未观测到降水, 回波反射率较低, 在 12~14.7 dBZ 之间, 各层液态水含量较少; 在过程后期, 液态水含量再次增大, 回波强度增大到 15 dBZ 左右不再增长, 粒子下落速度仍在 1~2 m/s, 地面降水形态逐渐由雪、雨夹雪向小雨、毛毛雨转变(固态转为液态), 随后过程结束。

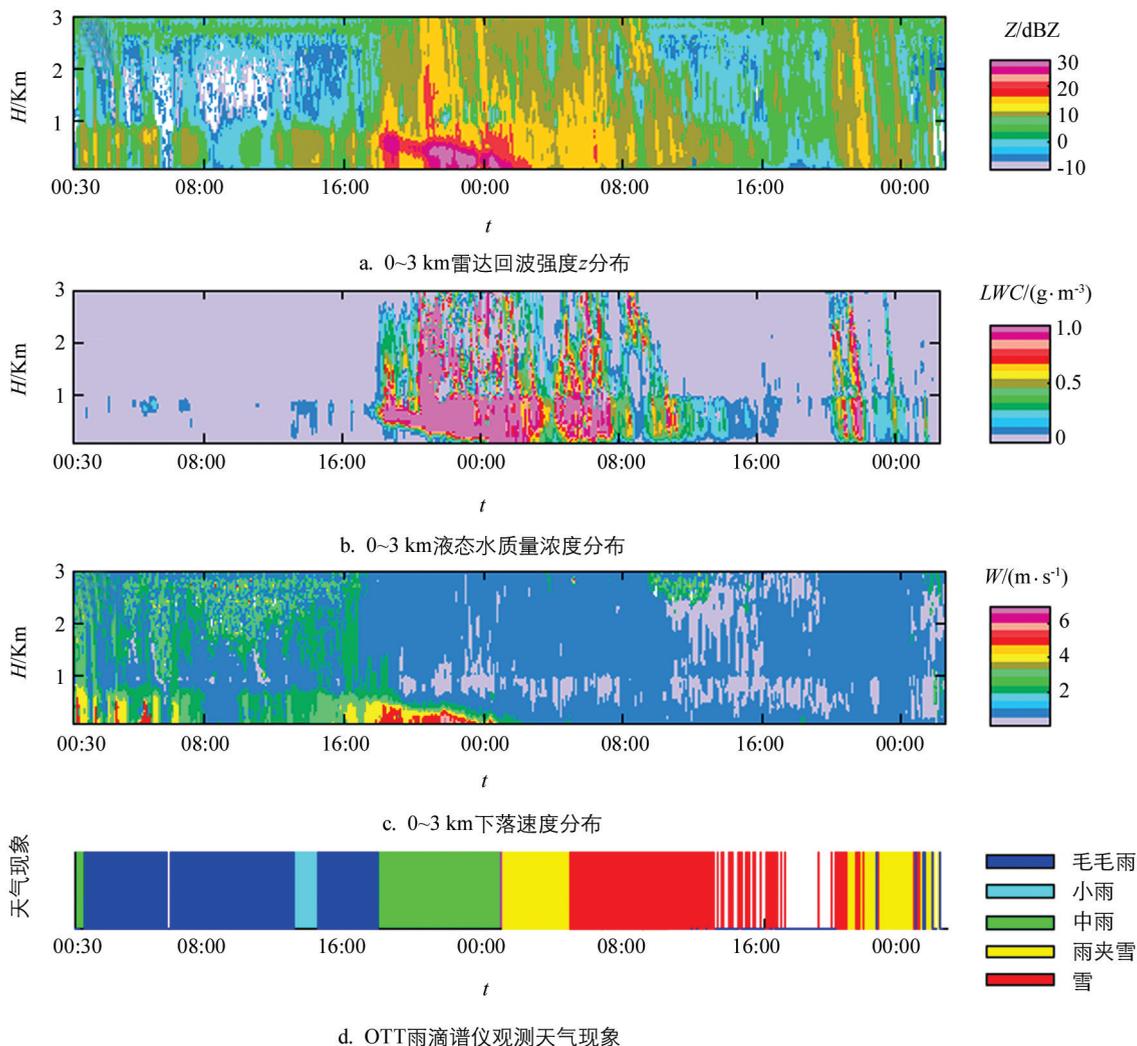


图 3 2016 年 1 月 22 日 0:30 至 1 月 24 日 2:30 MRR 观测物理量分布及 OTT 观测天气现象分布图

从各层粒子随时间演变图(图 4)来看, 1 km 以上粒子变化不大, 形态较为相似, 粒子数浓度高值区主要集中在 0.5 mm 以下, 高值区达 108 mm/m³。从近地面(100 m)DSD 时间演变图(图 5d)来看, 毛毛雨阶段粒子直径主要集中在 1 mm 以下, 随着冷空气的加强, 降水向中雨转变, 粒子平均直径也逐渐增大, 向 2 mm 延伸。降水转为雨夹雪后, 粒子直径逐渐减少, 且次数粒子数浓度迅速增大 1~2 个量级。转为纯雪阶段后, 粒子数浓度及直径分布与高层相似, 高值区主要集中在 0.5 mm 以下。与图 3 对应来看, 高空(1 km 以上)粒子的数浓度急剧增加的时段在 17 时后, 此时对应于高空液态水含量大值区和回波反射率大值区, 1 km 以下的 DSD 分布来看(图略), 粒子数浓度高值区同样存在倾斜特征, 一直到地面产生雨夹雪(1:13),

因此, 此大值区的出现表明高空粒子已从液态转为固态.

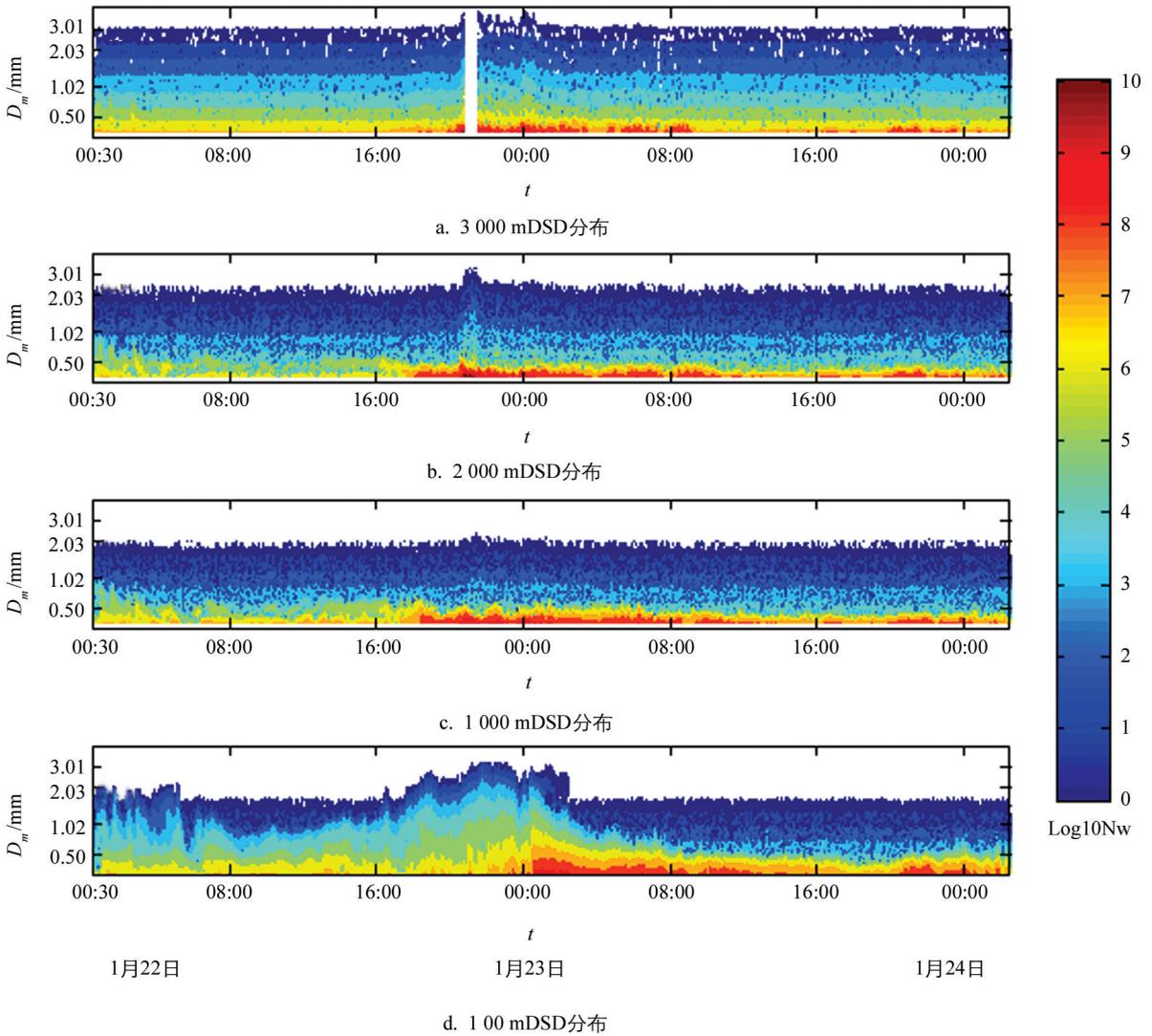


图 4 2016 年 1 月 22 日 0:30 至 1 月 24 日 2:30 不同探测高度 DSD 分布图

4.2 反射率及粒子下落速度变化特征

对整个雨转雪过程不同阶段的雷达反射率因子、粒子下落速度分布特征进行分析, 计算对应的频率分布及平均垂直廓线(图 5、图 6), 频率分布图中的蓝色虚线曲线为对应物理量的平均垂直廓线, 概率分布为同一高度层按一定间隔分布统计所得, 全过程样本数为 3001×30 个.

从图 5a~h 各阶段下不同高度层的雷达反射率频率分布来看, 在毛毛雨阶段(图 5a), 雷达反射率 Z 在 1 km 以下主要集中在 $0 \sim 10$ dBZ 之间, 1 km 以上主要集中在 5 dBZ 以下; 小到中雨阶段(图 5b), 随高度降低 Z 逐渐增加, 1 km 以上主要集中在 $0 \sim 20$ dBZ 之间, 平均值在 10 dBZ 附近, 1 km 以下有所拓展, 在 $10 \sim 20$ dBZ 之间, 平均值从 10 dBZ 增长到 20 dBZ; 雨夹雪阶段(图 5c), Z 随高度降低逐渐增加, 但增长幅度不大, Z 的频率分布逐渐趋于向 $10 \sim 20$ dBZ 区间段集中; 转为纯中雪阶段后(图 5d), Z 随高度变化不大, 频率分布较为均匀, 主要集中在 $5 \sim 20$ dBZ 之间, 平均值为 10 dBZ 左右; 中雪转为小雪后(图 5e), Z 随高度降低呈现波动变化, $2 \sim 3$ km 随高度逐渐减小, 平均值小于 0 dBZ, 2 km 以下逐渐增大, 各层频率分布较中雪阶段更为集中; 随着天气过程继续减弱为零星小雪(图 5f), 回波反射率进一步降低, 各层 Z 值在 10 dBZ 以下, 平均值 1 km 以上在 1 dBZ 左右, 1 km 以下在 5 dBZ 以下, 且在近地面逐渐降低; 图 5g 为

短暂间歇期, 地面未观测到明显降水, 1 km 以下 Z 平均值在 0 dBZ 以下, 但 1KM 以上仍有较弱回波, 50% 以上的样本分布在 5 dBZ 附近; 在降水末期(图 5h), 各层 Z 频率再次趋于均匀分布, 地面以小雨、毛毛雨、小雪等多种天气混杂, 各层回波反射率平均值变化不大, 在 2~3 dBZ 之间; 整个过程来看(图 5i), Z 的平均值在 0~10 dBZ 之间, 1 km 以前变化不大, 1 km 以下有所增加, 主要原因是中雨阶段粒子平均直径增长明显, Z 值大幅增大, 从频率分布来看, 2.8 km 以下频率分布较为平均。

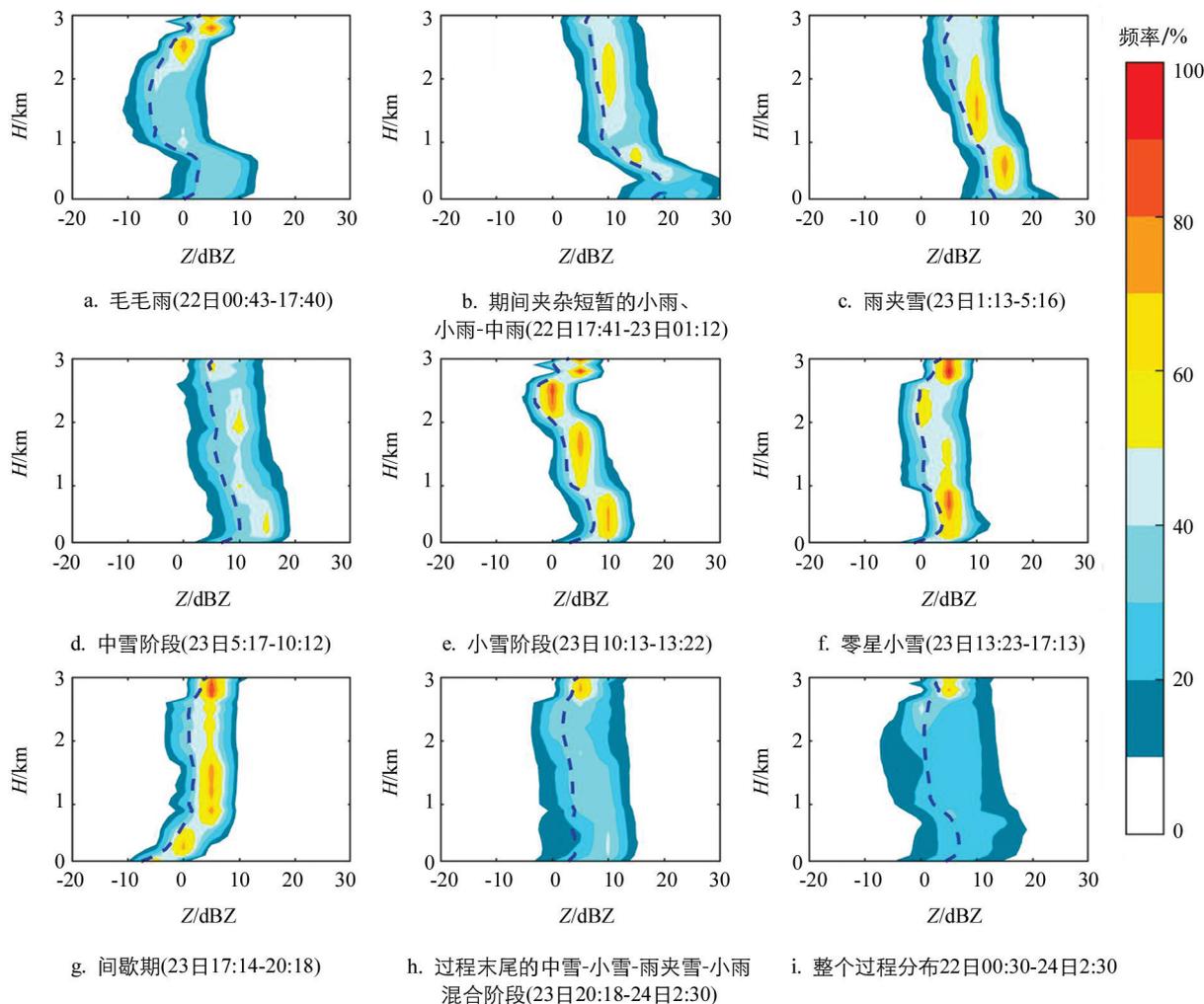


图 5 不同降水阶段的雷达反射率因子频率分布图

图 6 为不同阶段的各层粒子下落速度频率分布图, 蓝色虚线为平均速度廓线. 可以看出, 毛毛雨阶段(图 6a)粒子平均下落速度在 1~2 m/s 之间, 1 km 以上频率分布较为均匀, 均值变化不大, 1 km 以下速度有拓宽趋势; 小到中雨阶段(图 6b), 1 km 以上粒子下落速度进一步向 1 m/s 附近集中, 1 km 以下速度最大超过 5 m/s; 随后的阶段(图 6c~h)开始降雪(雨夹雪、小雪、中雪等), 各层频率分布变化不大, 基本集中在 1 m/s 附近, 各高度层变化不大, 差异之处在于, 雨夹雪阶段低层略大于 1 m/s, 小雪转零星小雪阶段(图 6e)高层速度有较大变化, 间歇期低层主要集中在 1 m/s 以下; 整个过程来看(图 4i), 各层粒子速度变化不大, 频率分布较为集中, 主要在 1 m/s 附近. Nakaya 等^[20]研究发现, 雪花下落速度和尺度之间的关系主要取决于雪花的形状和它是否结霜, 各种平板状冰晶速度接近于 0.3 m/s 左右, 雪粒聚集物为 0.5 m/s, 立体枝状冰晶为 0.57 m/s. 当冻滴附着在冰晶上时, 下落速度增至 1 m/s, 此时速度随尺度增大. 可见此阶段粒子多以雪粒聚集物和立体枝状冰晶为主. 此次过程中(图 6b)1 km 以上各层粒子下落速度平均分布在 1 m/s 左右, 可能表征了高空已经完成雨向雪的转变。

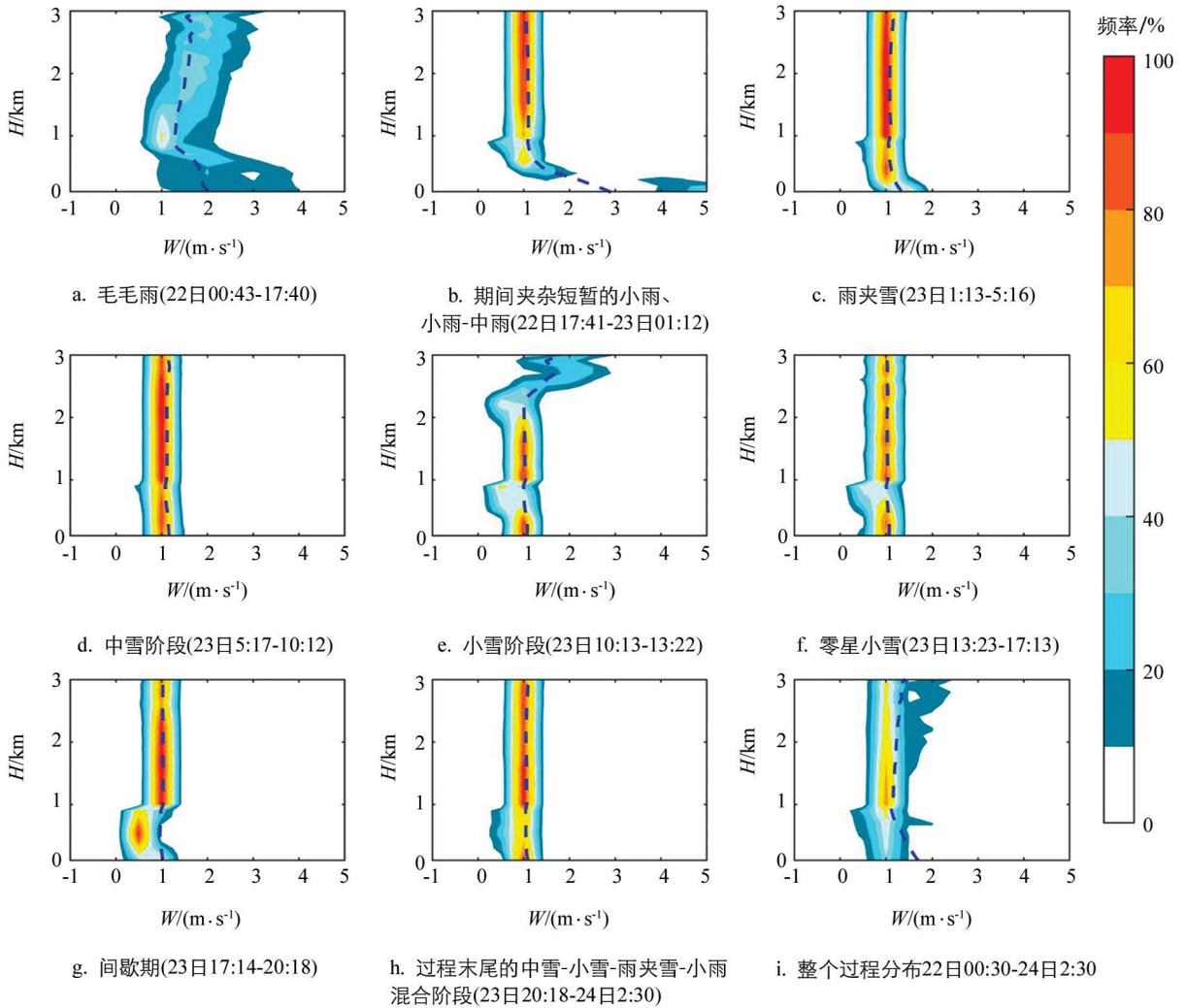


图 6 不同降水阶段的粒子下落速度频率分布图

4.3 降水微物理特征量垂直演变特征

图 7 为不同降水阶段的液态水含量 LWC 、雨强 R 、雨滴数浓度 N_0 以及雨滴平均直径 D 平均垂直廓线。从液态水含量 LWC 、雨强 R 的平均垂直廓线来看,两者具有类似特征,1 km 以上变化不大,400 ~ 1 000 m 高度层液态水含量有所增加,400 m 以下随高度降低,从降水阶段的平均廓线来看,毛毛雨、中雪、小雪、零星小雪等阶段液态水含量、雨强在垂直高度上变化不大。天气较强的中雨阶段, LWC 、 R 变化较为明显,在垂直高度上与整个过程的平均廓线特征较为一致;雨滴数浓度(图 7c)在各降水阶段变化特征较为明显,1 km 以上各层平均数浓度随高度降低逐渐增大,1 km 以下平均数浓度逐渐减小,毛毛雨阶段雨滴数浓度最小, $\lg(N_0)$ 值在 2~4 之间,小、中雨阶段数浓度变化最大,平均值在 3~5 之间,小雪阶段数浓度变化梯度最大,高层数浓度与小雨阶段接近,低层与雨夹雪阶段较为接近。总的来看,随着降雪阶段(固态降水)的不断演变,粒子数浓度存在逐渐降低的趋势;图 7d 表明,此次降水过程平均雨滴直径整体较小,前期(毛毛雨、小中雨)随着天气加强,平均半径随高度降低有所增加,转为降雪后各高度层平均粒子半径变化不大,但在小雪阶段高层出现了粒子半径拓宽的现象,此次粒子数浓度剧减,结合粒子下落速度来看有明显增长,表明此高度层粒子可能以液态粒子为主,一定程度上揭示了高空粒子相态的转变。

4.4 降水粒子平均谱垂直分布特征

雨滴谱分布特征是了解降水的关键,为进一步分析雨滴在垂直方向上的分布特征,对不同降水阶段的

雨滴谱进行平均分析. 图 8 给出了此次雨转雪天气过程中不同降水阶段的平均雨滴谱随高度变化情况. 可以看出, 在毛毛雨阶段(图 8a)粒子直径主要集中在 1 mm 以下, 数浓度最大量级为 10^4 , 粒子数浓度在垂直方向上变化不大; 小、中雨阶段(图 8b), 1 km 以上小粒子数浓度变化不大, 但量级较毛毛雨阶段有明显增长, 达到 10^6 . 中等尺度、大粒子数浓度随高度降低有所减少. 1 km 以下小粒子数浓度变化相对不大, 中等尺度、大粒子数浓度随高度降低增长较大, 结合雨滴下落速度来看, 可能表明此阶段有部分中等尺度、大尺度粒子转化为雪晶, 粒子聚合效应明显. 而在 1 km 粒子仍以液态水存在为主, 且雨滴间的碰并增长效应较强; 降雪各阶段(图 8c~h)雨滴平均谱变化不大, 各阶段谱型较为类似, 小粒子数浓度在垂直方向上变化不大, 中、大尺度粒子随着高度降低略微减少, 在 2 km 以下逐渐趋于平稳, 粒子最大数浓度在降雪前期维持在 10^6 的量级上, 但在降雪后期(图 8f~h)最大值逐渐降低到 10^4 量级, 整个过程来看(图 8i), 小粒子在垂直高度上变化不大, 中、大尺度粒子数浓度随高度降低有先减小后增大的趋势.

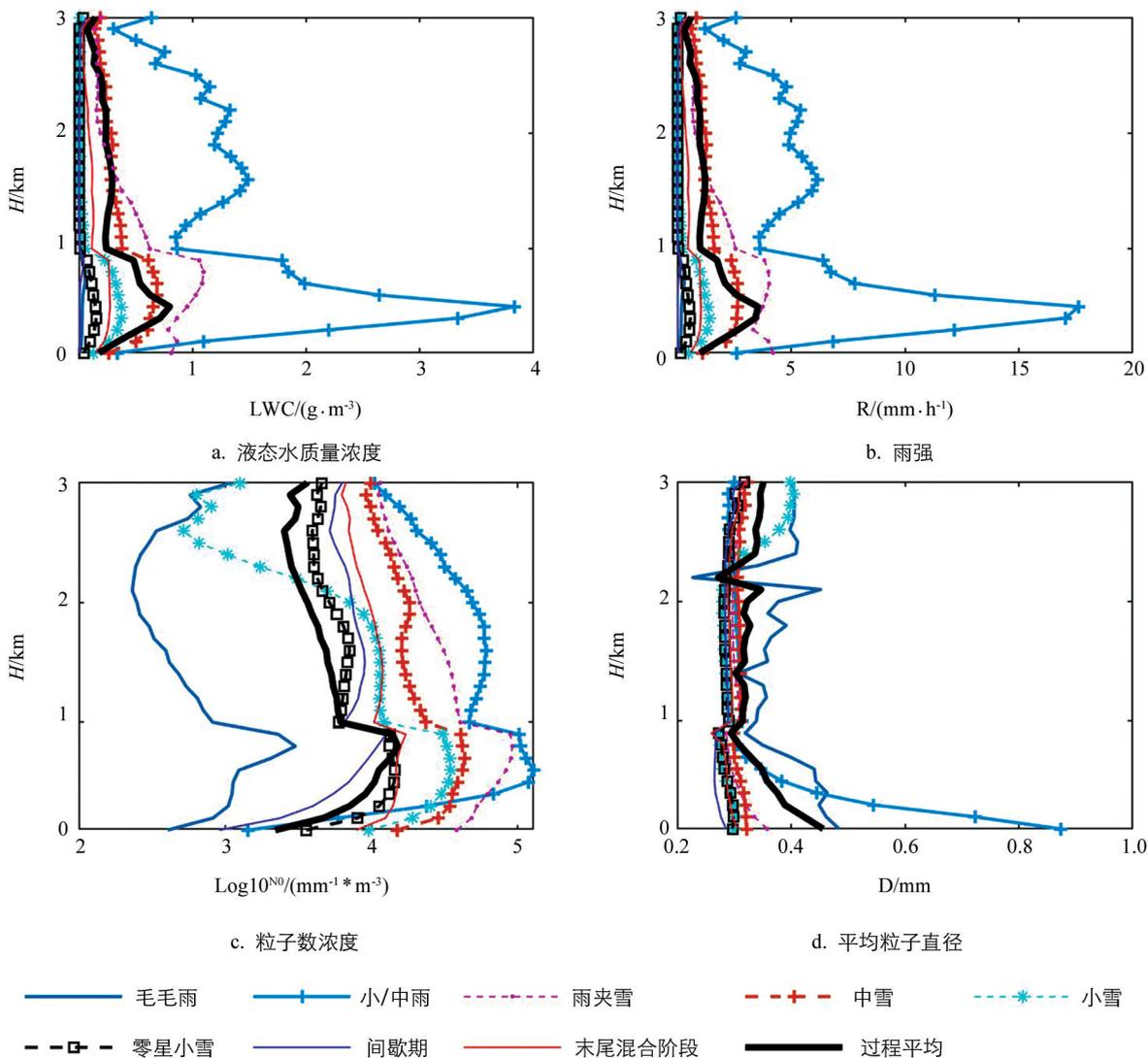


图 7 不同降水阶段特征量平均廓线

综上, 降水不同过程粒子谱有着不同的垂直分布特征, 前期为稳定弱降水阶段, 各层粒子浓度变化不大, 转为较强的中雨阶段后, 低层雨滴碰并增长明显, 随着天气由雨转为雨夹雪, 各层雨滴分布逐渐趋于平稳, 完全转雪后, 各层粒子浓度变化不大, 一直到降雪后期. 后期过程结束主要以雨滴数浓度减少为主, 粒子尺度分布较为稳定.

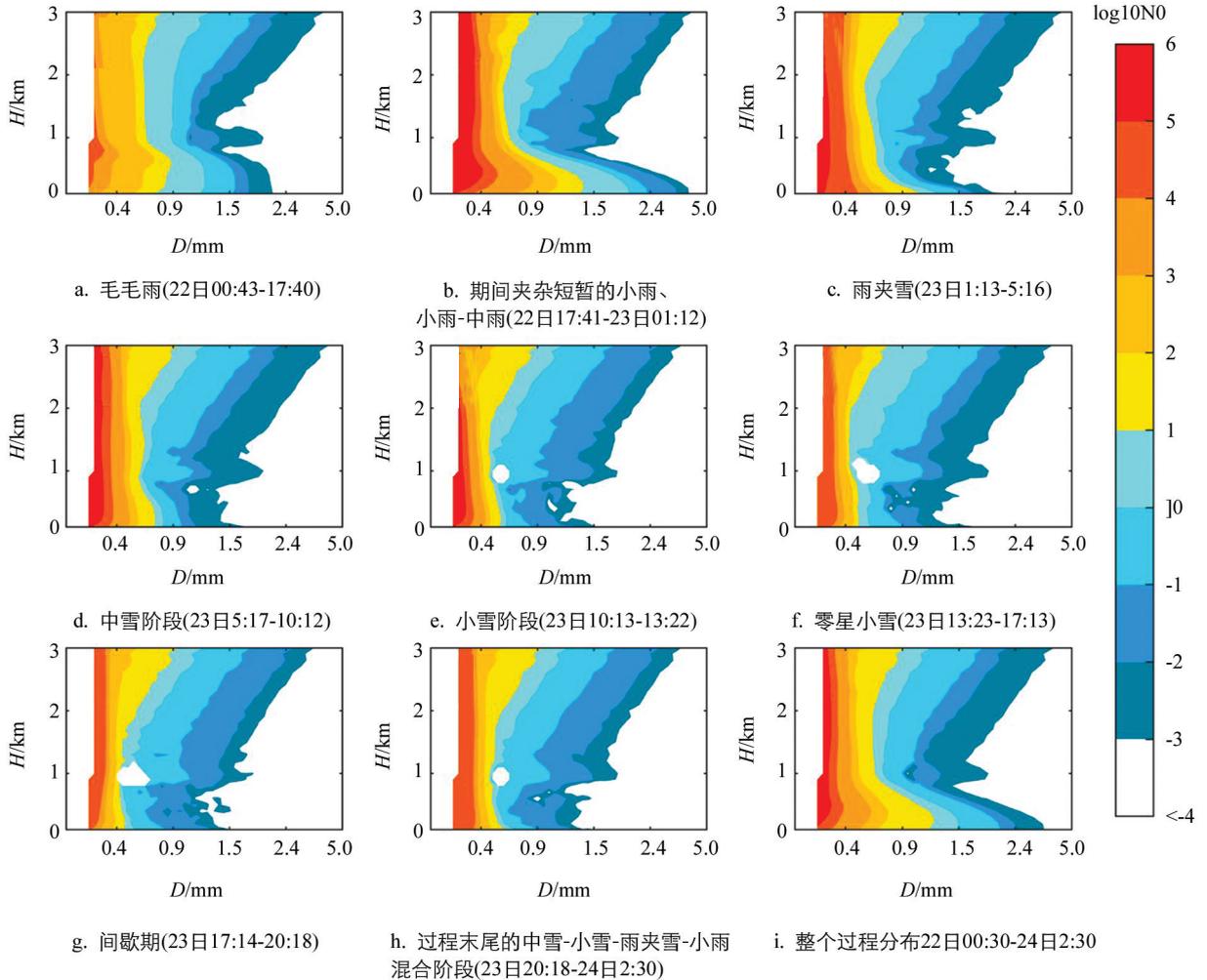


图 8 不同降水阶段垂直方向上的粒子谱分布图

5 结 论

利用布设在沙坪坝站的雨滴谱仪和微雨雷达获取的连续观测资料,对 2016 年 1 月 22—24 日的一次雨转雪天气过程降水微物理特征进行分析,得出如下结论:

1) 此次天气过程持续时间长达 49 h 47 min,其中纯液态降水阶段 24 h 29 min,累积降雨量 13 mm,累积降雪(含雨夹雪)时长 25 h 18 min,降水量 13.8 mm.粒子的相态变化与冷空气活动有密切关系.相比雨滴谱仪观测雨强,两者趋势较为一致.

2) 微雨雷达近地面观测物理量与地面雨滴谱仪观测物理量对比表明,两者在对雨强的观测上较为一致,但在雨夹雪阶段存在较大差异,这是由于雨夹雪阶段雨滴谱仪修正公式不同造成的.对粒子谱的观测来看,在纯降雪阶段,受观测原理影响,微雨雷达和雨滴谱仪观测谱有明显不同.

3) 液态降水阶段的雨滴平均特征值和滴谱的垂直特征与固态降水(雪)阶段差异较大,液态降水表现为垂直下落方向上先减小后增大的特征,粒子碰并增长特征明显,固态降水(雪)垂直方向上则较为稳定.

4) 不同降水阶段的雨滴特征量变化差异较大.在毛毛雨阶段,各特征量在垂直方向上变化不大,粒子数浓度较小.在中雨阶段,粒子下落速度、粒子平均直径在高空已经表现为雪花的特征,低层随高度降低而增加,表现为液态粒子碰并增长的特征,其特征量表现为 500 m 以上(以下)随高度降低增大(减小)的特征.在降雪各阶段,各特征量变化较为一致.

5) 借助微雨雷达以速度来反演粒子大小这一特征, 可以较清晰地推断垂直方向上粒子相态的转变. 此次过程地面观测到中等强度降水时, 高空粒子下落速度均匀分布在 1 m/s 附近、回波反射率 Z 分布在 10 dBZ、粒子数浓度急剧增加等物理量特征表明高空以冰雪晶为主, 随着时间演变, 这一特征向地面倾斜, 逐渐接地, 地面天气现象转变为雨夹雪; 而小雪阶段高空粒子相态的突然转变, 可能预示天气过程的转变. 这一特征可较好地应用于对于降雪的临近及结束预报等. 重庆地区微雨雷达建成时间较短, 且观测高度仅为地面到 3 km 高度, 观测数据完整且高质量的个例分析较少, 针对本地区的观测研究结果有待进一步分析, 为相关资料在人工影响天气、天气预报中的应用累积经验.

参考文献:

- [1] 刘晓冉, 程炳岩, 向波, 等. 全球变暖背景下重庆主要气象灾害变化趋势 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(3): 110-117.
- [2] 邓国卫, 孙俊, 郭海燕, 等. 四川泥石流灾害分区及其与诱发降水关系 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 95-102.
- [3] 罗玉, 陈超, 马振峰, 等. 四川盆地夏季区域性极端降水事件特征及其成因 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(5): 128-138.
- [4] 刘晓冉, 李国平, 李永华, 等. 一次引发重庆大暴雨的西南低涡动力诊断分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(5): 160-169.
- [5] 邓国卫, 孙俊, 王敏. 2011年3月川西高原一次区域暴雪过程分析 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(9): 115-122.
- [6] 潘娅婷, 杨芳园, 李晓鹏, 等. 2013年云南冬季四次降雪天气过程对比分析 [J]. 高原山地气象研究, 2017, 37(2): 22-28.
- [7] 周文钰, 张东海. “2014. 02”贵州强降雪天气过程物理量诊断分析 [J]. 防灾科技学院学报, 2015, 17(1): 12-18.
- [8] 李鸾, 周先春, 叶树青. 风廓线雷达在一次大到暴雪天气过程中的应用 [J]. 气象水文海洋仪器, 2014, 31(1): 70-74.
- [9] 尹丽云, 李辰, 李红梅, 等. 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), 2017, 39(4): 598-608.
- [10] 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.
- [11] 张治, 刘青, 李崇, 等. 利用激光雨滴谱仪对一次雨转雪过程分析 [J]. 现代农业科技, 2016(4): 219-221.
- [12] CHA J W, CHANG K H, YUM S S, et al. Comparison of the Bright Band Characteristics Measured by Micro Rain Radar (MRR) at a Mountain and a Coastal Site in South Korea [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(2): 211-221.
- [13] GARCIA-VILA P, BENARROCH A, GARCIA P, et al. Micro Rain Radar Measurements of Rainfall in Madrid [C] // 2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation. March 23-27, 2009, Berlin, Germany. IEEE, 2009: 676-680.
- [14] 温龙, 刘溯, 赵坤, 等. 两次降水过程的微降雨雷达探测精度分析 [J]. 气象, 2015, 41(5): 577-587.
- [15] 王洪, 雷恒池, 杨洁帆. 微降水雷达测量精度分析 [J]. 气候与环境研究, 2017, 22(4): 392-404.
- [16] 孙豪, 刘黎平, 郑佳锋. 不同波段垂直指向雷达功率谱密度对比 [J]. 应用气象学报, 2017, 28(4): 447-457.
- [17] 崔飞扬, 周毓荃, 蔡森. 利用微雨雷达观测一次层状云降水的垂直结构 [C] // 第34届中国气象学会年会论文集. 郑州, 2017: 29-30.
- [18] PETERS G, FISCHER B, ANDERSSON T. Rain Observations with a Vertically Looking Micro Rain Radar (MRR) [J]. Boreal Environment Research, 2002, 7(4): 353-362.

- [19] 崔云扬. 利用微雨雷达研究不同云系降水的垂直结构分布与演变特征 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [20] NAKAYA U, TERADA T. Simultaneous Observations of the Mass, Falling Velocity and Form of Individual Snow Crystals [J]. Journal of the Faculty of Science Hokkaido Imperial University. ser Physics, 1935, 1(7): 191-200.

A Case Study of Microphysical Characteristics During a Rain to Snow Conversion in Chongqing

ZHANG Yi-xuan¹, LIAO Xiang-hua¹, ZHANG Feng-wei²

1. Chongqing Weather Modification Office, Chongqing 401147, China;

2. Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730030, China

Abstract: In order to understand the microphysical characteristics of precipitation in Chongqing, the vertical raindrop spectra recorded during a rain to snow conversion on January 22-24, 2016 by MRR (micro rain radar) and OTT Parsivel2 raindrop spectrometer in Shapingba Weather Observatory of the city were used to analyze the particle fall velocity, radar reflectivity and particle spectra in this weather process. The results showed that the raindrop spectrometer and the micro-rain radar could well be applied to the study of precipitation vertically under the cloud; that during this precipitation process, the droplet mean diameter and droplet spectrum distribution of liquid precipitation were obviously different from those of solid precipitation: in liquid precipitation, a decrease was detected followed by an increase down from the cloud, caused by the collision-coalescence process, while in solid precipitation, the values of these microphysical characteristics were relatively stable; and that due to the principle of MRR observation, the phase change of particles in the process of rain to snow conversion was marked by the uniformly distributed falling velocity of particles around 1 m/s, the dramatic increase of particle concentration by magnitude, and the Z distribution reflectivity around 10 dBZ.

Key words: MRR (micro-rain radar); microphysical characteristics; rain to snow conversion

责任编辑 包 颖