

姜嘉俊,王晓慧,刘圣楠.微雨雷达在宁波典型降水过程中的表现特征[J].气象研究与应用,2021,42(1):20-26.

Jiang Jiajun, Wang Xiaohui, Liu Shengnan. Performance characteristics of micro rain radar in typical precipitation process in Ningbo [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2021, 42(1): 20-26.

微雨雷达在宁波典型降水过程中的表现特征

姜嘉俊¹, 王晓慧², 刘圣楠³

(1.宁波市气象台, 浙江 宁波 315012; 2.宁波市海曙区气象局, 浙江 宁波 315012;

3.金华市气象局, 浙江 金华 321023)

摘要: 利用宁波微雨雷达(MRR)数据,进行仪器观测雨强评估,在此基础上,分析了宁波地区三次典型过程的雨滴谱和降水特征量分布情况,并对降水特征量在雨强预报中的应用做了初步分析。结果表明,MRR具备较可靠的降水观测能力,三次过程中雨滴粒子浓度均随雨滴直径增大而减小。西风槽和梅雨过程雨滴谱基本相似,液态水含量均较小且变化不明显;而台风“黑格比”雨滴粒子浓度更高,粒径范围更大,液态水含量显著提高且随高度降低而减小,粒子有效直径随高度降低明显增大,粒子数浓度明显减小,说明台风中雨滴碰并增长作用较强,大量小粒子相互碰并成大粒子。整层积分的液态水含量和整层平均的粒子有效直径对降水强度预报有较好的指示作用,二者变化均提前于降水强度变化约10min左右。

关键词: 微雨雷达;雨滴谱;液态水含量;雨强

中图分类号: P412.25 **文献标识码:** A **doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.1.04

OSID:



引言

深入了解降水垂直结构和微物理过程对降水精细预报和人工影响天气具有重要意义^[1-3]。雨滴谱是指雨滴数浓度随雨滴直径的分布关系,是表征降水微物理特征的重要参数,对于了解降水微物理过程,改进数值模式中微物理参数化方案具有重要作用^[4-5]。此外,雷达反射率因子与降水强度之间的Z-R关系同样基于雨滴谱拟合得到^[6-8]。

已有研究大多基于一维或二维雨滴谱仪针对地面雨滴谱展开。宫福久等^[9]利用地面雨滴谱仪在沈阳夏季测得的积云、层云和层积混合云降水资料,分析了三类云降水雨滴谱的谱型和拟合参数。房彬等^[10]利用辽宁地区激光雨滴谱仪资料研究了积雨云、积层混合云和层状云降水系统雨滴谱特征量和谱参数的平均特征及其随时间演变。刘红燕和雷恒池^[11]利用声雨滴谱仪资料,分析了北京地区对流云降水和层状云降水中的雨滴谱特征。

雨滴在下落过程中受重力、浮力和空气阻力共同作用,会发生碰并、破碎和蒸发等过程,这些物理过程会造成高空和地面的降水特征出现差异。由于探测手段的限制,目前对于降水特征量垂直廓线和不同高度上雨滴谱的观测十分有限。仅少数研究使用架设在不同高度山坡上的雨滴谱仪或飞机观测,分析了雨滴谱在垂直方向的演变特征。陈万奎等^[12]利用一次西安—武功的飞机观测数据分析了雨滴谱特征及其在水平方向的变化。陈聪等^[13]利用黄山不同高度上的雨滴谱观测资料对2011年6月一次降水过程进行了分析,指出各直径微物理量在山腰最大、山底次之、山顶最小,山腰的雨强最大,而山顶雨滴数浓度最大。李慧等^[14]则进一步对降水进行了分类(层状云和对流云),统计了黄山不同海拔高度上降水粒子谱的微物理特征,指出对流云降水雨滴的各类尺度参数和数浓度都比相同高度上的层状云降水大。可以看出,雨滴谱在垂直方向存在明显差异,而其随高度变化会引起雷达反射率因子的垂直变

收稿日期: 2020-09-19

基金项目: 宁波市气象局青年项目(NBQX2019002C)

作者简介: 姜嘉俊(1992—),男,硕士,助理工程师,主要从事天气预报与服务工作。E-mail: 1546257137@qq.com

化,进而导致雷达定量估计降水的偏差。因此,研究雨滴谱垂直分布就显得十分必要。

微雨雷达(Micro Rain Rader,简称 MRR)作为一种垂直指向雷达可以对雨滴谱垂直分布进行连续观测,由于其对观测环境要求低且安装方便,近年来成为了研究降水微物理特征的重要工具。崔云扬等^[15]利用 MRR 观测资料对河北邢台的一次层状云降水过程进行了分析,指出降水过程中小滴数浓度随高度降低有明显减小,中滴和大滴垂直变化较小。宋灿等^[16]同样利用河北邢台的观测数据统计分析了夏季层状云不同降水强度下雨滴谱垂直演变特征,指出对于弱降水,雨滴在下落过程中蒸发明显,而对于较强降水,雨滴下落过程中碰并作用更明显。过霁冰等^[17]则利用 MRR 对上海夏季不同强度降水过程中降水率、雷达反射率和液态水含量等进行了统计分析。

为探索以宁波为代表的浙江地区典型降水过程的微物理特征和雨滴谱随高度变化,为改进模式云微物理参数化方案和优化雷达定量估计降水算法提供依据,本文在对宁波余姚微雨雷达 2018 年 1 月—2019 年 12 月连续 24 个月观测进行评估的基础上,针对 2020 年以来的三次典型降水过程进行初步分析。

1 观测仪器和数据处理

1.1 观测仪器简介

观测使用的微雨雷达(MRR)由德国 METEK 公司生产,是一种垂直指向雷达,波长为 1.25cm(K 波段,24.23GHz),采用连续调频技术,通过获取多普勒功率谱,利用降水粒子下落速度与直径的经验公式反演得到不同高度、不同直径粒子对应的数浓度(雨滴谱)。后基于反演得到的雨滴谱计算不同雨滴谱参量随时间和高度的变化,从而分析降水的垂直分布和随时间的演变。MRR 参数如表 1 所示。本文使用

表 1 MRR 主要参数设置

参数	取值
发射频率	24.23GHz
功率	50mW
波束宽度	2°
高度分辨率	10 ~ 200m (可调节)
时间分辨率	10 ~ 3 600s (可调节)
速度分辨率	0.191m · s ⁻¹
高度层数	31 层
可测粒径范围	0.246 ~ 5.03mm

数据的时间分辨率为 1min。

1.2 数据处理方法

由 MRR 观测获得的雨滴谱数据可以计算降水强度 R (单位: mm · h⁻¹)、雷达反射率因子 Z (单位: mm⁶ · m⁻³)、液态水含量 LWC (单位: g · m⁻³) 和有效直径 ED (单位: mm) 等微物理特征量。

$$\text{降水强度: } R = \frac{6\pi}{10^4} \sum_{i=1}^n V(D_i) N(D_i) D_i^3 \Delta D_i \quad (1)$$

$$\text{雷达反射率因子: } Z = \sum_{i=1}^n N(D_i) D_i^6 \Delta D_i \quad (2)$$

$$\text{液态水含量: } LWC = \frac{\pi}{6000} \sum_{i=1}^n N(D_i) D_i^3 \Delta D_i \quad (3)$$

$$\text{有效直径: } ED = \frac{\sum_{i=1}^{64} N(D_i) D_i^3 \Delta D_i}{\sum_{i=1}^{64} N(D_i) D_i^2 \Delta D_i} \quad (4)$$

其中, $N(D_i)$ 是 MRR 反演得到的一定高度上单位体积单位谱间隔内雨滴数浓度, $V(D_i)$ 是第 i 档速度谱下落速度, D_i 为第 i 档雨滴直径, ΔD_i 为对应的直径间隔。

2 结果与分析

2.1 仪器评估

为了解 MRR 观测可靠性,对其雨强观测结果进行了评估。选取 2018 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日的反演降水与余姚站雨量筒观测的小时降水进行对比。已有研究指出,由于受地形等影响, MRR 近地面观测的降水并非最接近雨量筒实况^[18]。所以分别选取离地 35m、100m、200m 和 500m 高度的 MRR 观测小时雨强和雨量筒进行了对比 (图 1)。可以看到,无论哪个高度,大部分时次 MRR 观测的降水强度均小于雨量筒。MRR 在 100m 高度上观测的雨强 (图 1b) 和雨量筒最为接近,二者相关系数 94%,变化趋势具有显著的一致性。35m 高度上观测雨强和实况相比误差反而更大,而 500m 高度上雨强明显偏小,这可能是因为降水在产生的过程中本身在不同高度上分布的粒子数量等就不一样。且垂直发射的电磁波越到高层受到降水粒子的衰减作用也会越明显。总体来看, MRR 具备一定的降水观测能力,尤其在 100m 高度上观测的雨强能较好的表征实际降水强度。

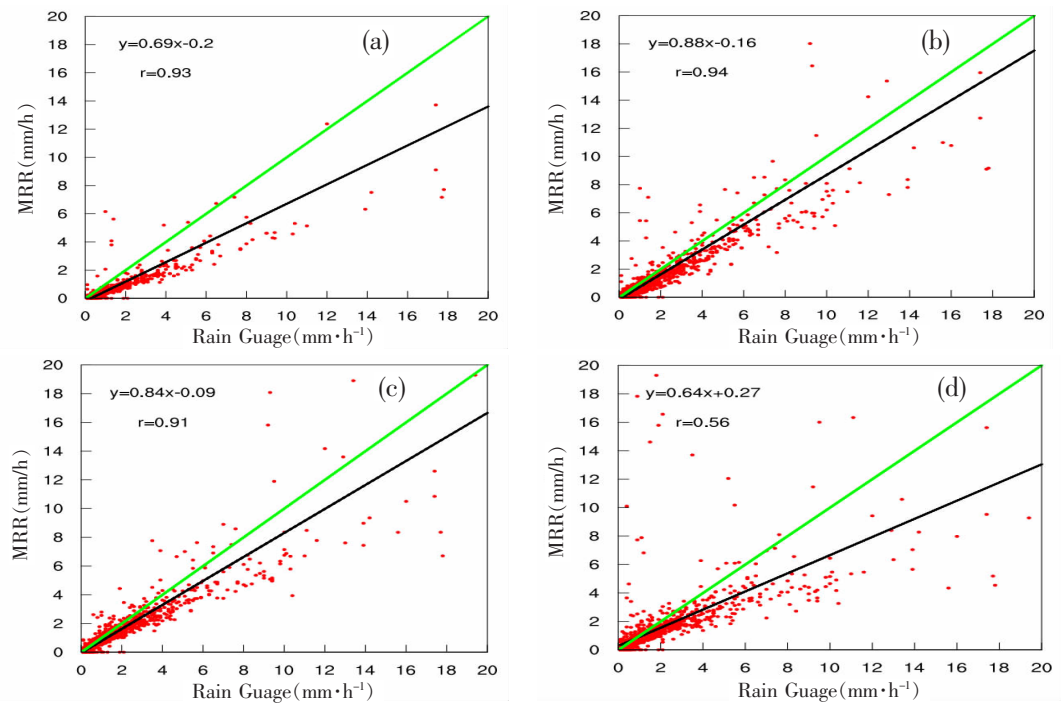


图 1 MRR 不同高度观测小时雨强和雨量筒对比
(a)35m;(b)100m;(c)200m;(d)500m);绿线为理论上二者相等时的趋势线,黑线为线性回归

为了更细致的评估 MRR 对不同强度降水的观测能力,将小时雨强按表 2 的降水等级进行划分,分别得到了小雨、中雨、大雨及以上时 MRR 在 100m 高度上观测到的雨强与雨量筒对比情况(图 2)。可以看到,在小雨时,MRR 观测雨强偏小,且离散度较大。中雨时,虽然 MRR 观测雨强仍然偏小,但离散度明显减小,观测稳定性有所提高,二者的相关系数达到了 0.85。对于大雨及以上时,MRR 观测雨强偏

小的情况基本改善,和雨量筒观测降水相比表现出了较好的一致性,但由于观测时次较少,具有一定的不确定性。

表 2 小时降水等级划分标准

等级	小雨	中雨	大雨及以上
降水量(mm)	0.1 ~ 1.5	1.6 ~ 6.9	≥7

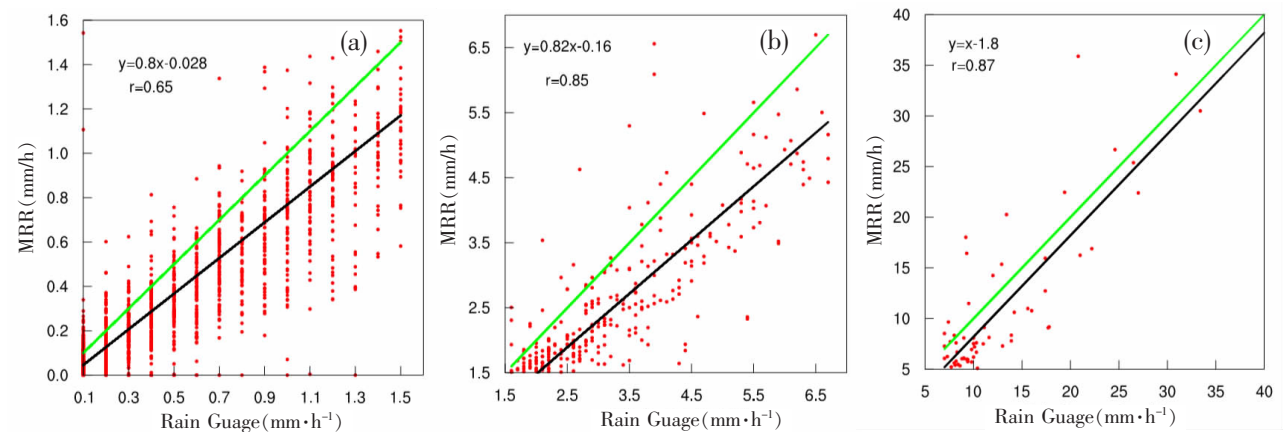


图 2 不同降水强度下 MRR 在 100 米高度上观测小时雨强评估情况
(a)小雨;(b)中雨;(c)大雨及以上;绿线为理论上二者相等时的趋势线,黑线为线性回归

综上, MRR 具备一定的降水观测能力, 尤其在 100m 高度上观测的雨强能较好的表征实际降水强度。对于中雨和大雨, 观测相对稳定, 对于小雨, MRR 观测稳定性不足, 极端偏差情况较多。

2.2 典型个例分析

在总体评估的基础上, 为了研究微雨雷达产品在宁波典型降水过程中的表现特征, 选取了三次具有代表性的过程进行分析, 分别为冬季西风槽降水(2020 年 1 月 24 日 00 时—26 日 23 时)、夏季梅雨期降水(2020 年 6 月 18 日 20 时—21 日 20 时)和台风“黑格比”降水(2020 年 8 月 4 日 17 时—5 日 03

时)。

由前文评估结果可以看到, MRR 在 100m 高度上观测雨强和雨量筒较为接近。因此, 首先对三次典型过程中 MRR 在 100m 高度上观测的雨强和雨滴谱分布情况进行分析(图 3)。MRR 观测雨强总体偏小, 但变化趋势和雨量筒实况非常接近。从雨滴谱演变可以看到, 雨滴浓度和直径随降水强度变化明显。对于西风槽和梅雨降水, 大部分雨滴直径在 1mm 以下, 而台风降水中出现大量直径超过 1.5mm 的雨滴。

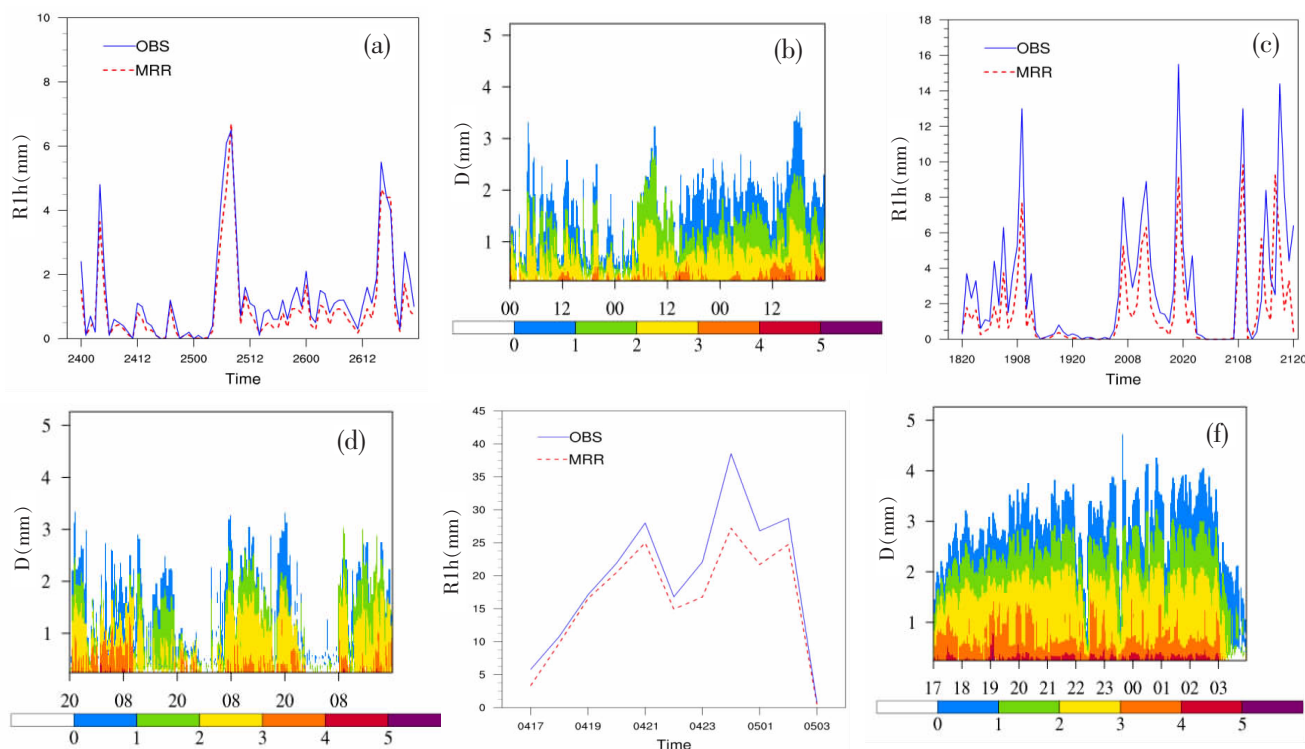


图 3 三次典型过程雨强和雨滴谱分布情况

a、c、e 分别为西风槽、梅雨、台风“黑格比”MRR 在 100m 高度上观测小时雨强和雨量筒对比; b、d、f 为相应的 MRR 在 100m 高度上观测的雨滴谱随时间变化; 填色为粒子数浓度的对数 $\log_{10}N$

为了更好的分析三次降水过程中雨滴谱总体特征, 将 MRR 在 100m 高度上观测的雨滴谱做过程时间平均(图 4), 可以看到三次降水过程中雨滴浓度随着雨滴直径增大而减小, 浓度大于 $10^2(\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1})$ 的雨滴粒子直径分布在小于 1.5mm 范围内。西风槽和梅雨过程中雨滴谱基本相似, 雨滴直径在 0.2~3mm 范围内, 而台风“黑格比”降水雨滴粒子直径范围更大, 在 0.2~5.4mm 范围内, 更多的大降水粒子能产生更强的降水, 这正是台风“黑格比”降水更强的原因。

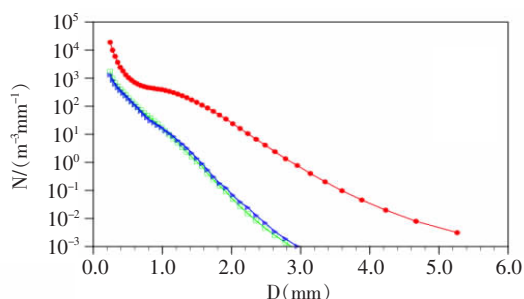


图 4 三次典型过程 100m 高度上观测的雨滴谱分布
横坐标为雨滴直径, 纵坐标为雨滴数浓度,
绿色为西风槽, 蓝色为梅雨, 红色为台风“黑格比”

图 5 为三次过程中降水特征量随高度变化情况。对于西风槽和梅雨降水,各高度上降水强度基本一致,而台风“黑格比”随着高度降低,雨强则呈现增大的趋势,但在近地面 35m 高度上雨强却突然降低,这可能是近地面地形对垂直速度有影响造成的。对于液态水含量(图 5b),西风槽和梅雨降水也相似,二者均较小,且随高度变化不明显。而台风“黑格比”液态水含量基本是前者的 5 倍以上,这和台风期

间,水汽输送充沛有关。随着高度降低,台风降水过程中液态水含量减小,这可能是由于蒸发作用造成,尤其小雨滴下落过程中受蒸发作用会使液态水含量随高度降低而减小。此外,在台风降水过程中,随高度降低,粒子有效直径明显增大,粒子数浓度明显减小。说明在台风降水过程中雨滴碰并增长作用较显著,大量小粒子相互碰并成为大粒子。

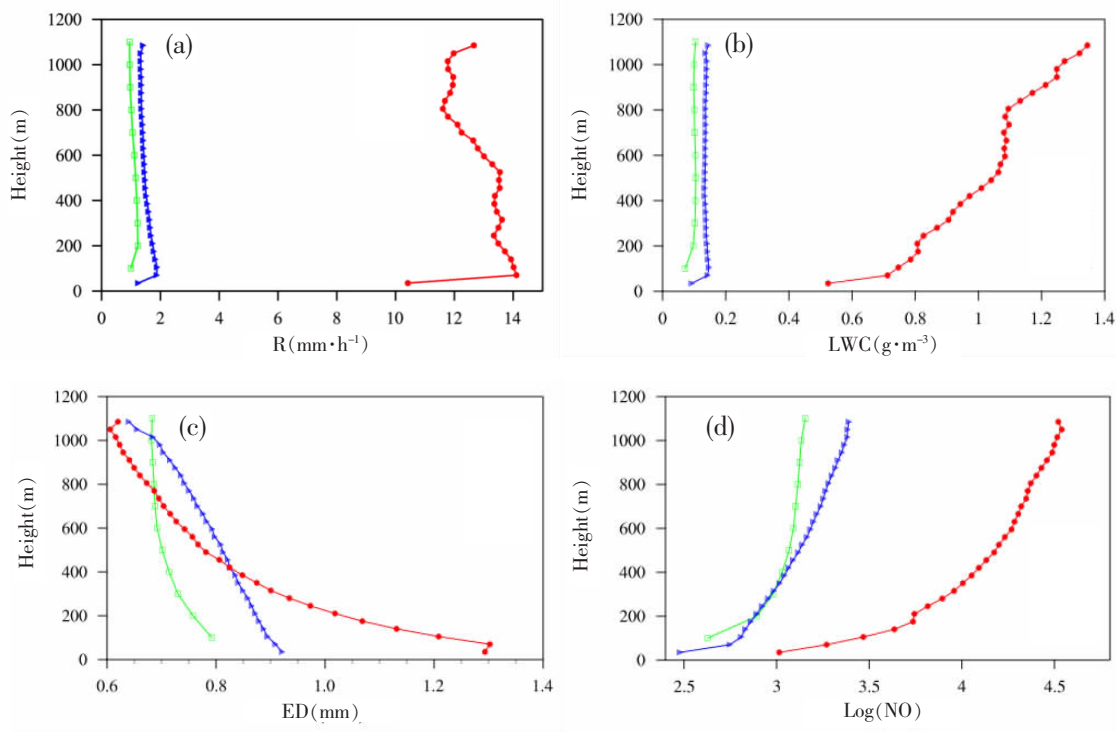


图 5 三次典型过程(a)雨强、(b)液态水含量、(c)有效粒径和(d)雨滴数浓度平均随高度变化
绿色为西风槽,蓝色为梅雨,红色为台风“黑格比”

2.3 预报应用

在分析了三次典型过程中降水特征量随高度总体变化的基础上,这些特征量变化对降水强度变化是否有指示作用,能否用于预报参考值得进一步关注。图 6 为西风槽过程中任意一个时段(2020 年 1 月 25 日 21—23 时)分钟降水特征量和雨量筒分钟降水的比较。从图 6a 可以看到,雨量筒观测降水在 21:50—22:10 和 22:30—22:40 有两个相对大值区,而整层液态水含量大值区则提前出现在了 21:40—22:00 和 22:20—22:30 左右,提前了大约 10min。从图 6b 滞后相关系数也可以看出,降水强度滞后整层液态水含量约 8~10min 时,二者相关系数最大,超

过了 0.8。说明整层液态水含量变化对于未来 8~10min 降水强度变化有很好的指示作用。而对于整层平均的有效直径(图 6c,6d),也可以看到,其相对于降水强度变化同样有大约 10min 的提前量。整层平均的有效直径与滞后 10min 的降水强度相关系数也达到了 0.6。同样表现出对未来 10min 左右的降水强度变化有很好的指示。

综上分析,整层积分的液态水含量和整层平均的粒子有效直径对于降水强度预报有较好的指示作用,二者变化均提前于降水强度变化约 10 分钟左右。

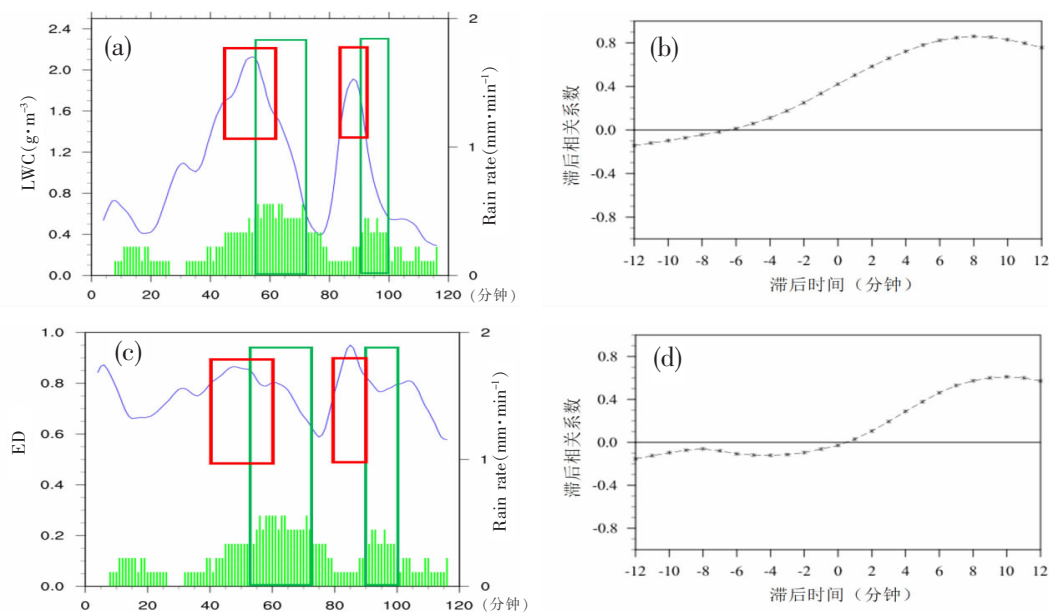


图6 西风槽降水过程中(2020年1月25日21时—23时)微物理特征量与降水强度关系

(a、c 分别为整层液态水含量、整层平均的有效直径和雨量筒分钟降水,b、d 分别为对应的滞后相关关系)

3 结论与讨论

对宁波余姚微雨雷达进行评估的基础上,选取了宁波地区三次典型降水过程(冬季西风槽、梅雨和台风“黑格比”),分析了三次典型过程的雨滴谱和降水特征量分布情况,对降水特征量在雨强预报中的可能应用做了初步分析,得到以下结论:

(1)评估表明,微雨雷达(MRR)具备一定的降水观测能力,尤其在100m高度上观测的雨强能较好的表征实际降水强度。在小雨时,MRR观测降水偏小,离散度较大。中雨和大雨及以上时,虽然MRR观测雨强仍然偏小,但离散度明显减小,观测稳定性有所提高。

(2)低层(100m)雨滴谱分布可以看到,三次典型过程中降水粒子浓度均随雨滴粒子直径增大而减小,浓度大于 $102(\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1})$ 的雨滴粒子直径分布在小于1.5mm范围内。西风槽和梅雨过程中雨滴谱基本相似,而台风“黑格比”雨滴浓度更高,粒径范围更大,这也正是台风“黑格比”降水更强的原因。

(3)西风槽和梅雨降水中液态水含量均较小,且随高度变化不明显。而台风“黑格比”液态水含量基本是前者的5倍以上,且随高度降低而减小。在台风降水过程中,粒子有效直径随高度降低明显增大,粒子数浓度明显减小。说明在台风降水过程中雨滴碰

并增长作用较强,大量小粒子相互碰并成为大粒子。

(4)整层积分的液态水含量和整层平均的粒子有效直径对于降水强度预报有较好的指示作用,二者变化均提前于降水强度变化约10min左右。

需要指出的是,本研究仅从个例出发分析了宁波地区三类典型降水过程的微物理特征,因此研究结果存在一定的不确定性。下一步需要通过更多个例进行统计分析,以期揭示更加普遍的特点。

参考文献:

- [1] 周毓荃,刘晓天,周非非,等. 河南干旱地面雨滴谱特征[J].应用气象学报,2001,12(1):39-47.
- [2] 尚博,周毓荃,刘建朝,等.基于Cloudsat的降水云和非降水云垂直特征[J].应用气象学报,2012,23(1):1-9.
- [3] 朱亚乔,刘元波. 地面雨滴谱观测技术及特征研究进展[J].地球科学进展,2013,28(6):685-694.
- [4] Jakob C. Accelerating Progress in Global Atmospheric Model Development through Improved Parameterizations: Challenges, Opportunities, and Strategies[J]. Bull Amer Meteor Soc,2010,91(7):869-875.
- [5] Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence[J]. Reviews of Geophysics, 1973,11(1):1-35.
- [6] Doelling I G, Joss J, Riedl J. Systematic variations of Z-R relationships from drop size distributions measured in northern Germany during seven years[J]. Atmospheric

- Research, 1998, 47(8): 635–649.
- [7] Zhang G, Sun J, Brandes E A. Improving Parameterization of Rain Microphysics with Disdrometer and Radar Observations [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2006, 63(4): 1273–1290.
- [8] 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, 31(5): 701–707.
- [9] 宫福久, 刘吉成, 李子华. 三类降水云雨滴谱特征研究[J]. 大气科学, 1997, 21(5): 96–103.
- [10] 房彬, 郭学良, 肖辉. 辽宁地区不同降水云系雨滴谱参数及其特征量研究[J]. 大气科学, 2016, 40(6): 1154–1164.
- [11] 刘红燕, 雷恒池. 基于地面雨滴谱资料分析层状云和对流云降水的特征[J]. 大气科学, 2006, 30(4): 693–702.
- [12] 陈万奎, 严采繁. 雨滴谱及其特征值水平分布的个例分析[J]. 气象, 1988, 14(1): 8–11.
- [13] 陈聪, 银燕, 陈宝君. 黄山不同高度雨滴谱的演变特征[J]. 大气科学学报, 2015, 38(3): 388–395.
- [14] 李慧, 银燕, 单云鹏, 等. 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, 2018, 42(2): 268–280.
- [15] 崔云扬, 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[A]. 中国气象学会第 34 届中国气象学会年会 S14 云降水物理与人工影响天气进展论文集[C]. 中国气象学会, 2017: 2–12.
- [16] 宋灿, 周毓荃, 吴志会. 雨滴谱垂直演变特征的微雨雷达观测研究[J]. 应用气象学报, 2019, 30(4): 479–490.
- [17] 过霁冰, 徐杰. 微型雨雷达产品在几次不同量级降水过程中的表现特征[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(9): 143–149.
- [18] 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.

Performance characteristics of micro rain radar in typical precipitation process in Ningbo

Jiang Jiajun¹, Wang Xiaohui², Liu Shengnan³

(1. Ningbo Meteorological Observatory, Ningbo Zhejiang 315012; 2. Haishu Meteorological Bureau, Ningbo Zhejiang 315012; 3. Jinhua Meteorological Bureau, Jinhua Zhejiang 321023)

Abstract: Based on the evaluation of rainfall intensity observed by instruments, the distribution of raindrop spectrum and precipitation characteristics of three typical processes in Ningbo area were analyzed by using the data of Ningbo micro rain radar (MRR), and the application of precipitation characteristics in rainfall intensity forecast was preliminarily analyzed. The results showed that MRR had the ability of reliable precipitation observation, and the raindrop particle concentration decreased with the increase of raindrop diameter in the three processes. The raindrop spectra of westerly trough and mould rain process were basically similar, and the liquid water content was less and the change was not obvious. The raindrop particle concentration of typhoon Hagupit was higher, the particle size range was larger, the liquid water content was significantly increased while it decreased with the decrease in height; the effective diameter of the particles increased significantly with the decrease in height, and the particle number concentration was significantly reduced. These indicated that raindrops had a strong impact on the growth of typhoon, and a large number of small particles collided with each other to form large particles. The integral liquid water content and the average particle effective diameter of the whole layer had a good indicator effect on the precipitation intensity forecast, and the changes of both were about 10 minutes ahead of the change of the precipitation intensity.

Key words: micro rain radar; raindrop spectrum; liquid water content; rain intensity