

张鹏,刘西川,周则明,等,2021. 基于实测雨滴谱数据的微波链路和天气雷达降水估计关系研究[J]. 气象,47(7):843-853.
Zhang P, Liu X C, Zhou Z M, et al, 2021. Research on precipitation estimators of microwave link and weather radar based on
raindrop size distribution data[J]. Meteor Mon, 47(7):843-853(in Chinese).

基于实测雨滴谱数据的微波链路和 天气雷达降水估计关系研究^{*}

张 鹏¹ 刘西川² 周则明² 宋 堃² 杨平吕²

¹ 陆军工程大学教研保障中心, 南京 210014

² 国防科技大学气象海洋学院, 长沙 410005

提 要: 利用南京地区连续两年夏季的实测雨滴谱数据, 分析了雨滴谱和降水特征, 区分降水类型计算了微波链路衰减系数与雨强的关系(雨衰关系)和雷达反射率因子与雨强($Z-R$)的关系, 所得关系与 ITU-R 雨衰模型和常用 $Z-R$ 关系均有差异, 其中对流性降水中的 $Z-R$ 关系为 $Z=161.63R^{1.55}$, 层状云降水为 $Z=227.23R^{1.53}$ 。在两次不同类型降水过程中利用微波链路和天气雷达反演降水, 结果表明: 使用 ITU-R 雨衰关系反演降水存在高估层状云降水、低估对流性降水的问题, 使用常用 $Z-R$ 关系反演降水存在明显低估降水的问题, 而使用雨滴谱计算的雨衰关系和 $Z-R$ 关系反演的降水与雨量计实测降水更加一致, 平均绝对误差降低, 相关性明显提高。说明使用实测雨滴谱数据计算得到的本地化的雨衰关系和雷达 $Z-R$ 关系, 能够提升定量测量降水的准确性。

关键词: 雨衰关系, $Z-R$ 关系, 雨滴谱, 定量测量降水, 微波链路, 天气雷达

中图分类号: P414

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.07.007

Research on Precipitation Estimators of Microwave Link and Weather Radar Based on Raindrop Size Distribution Data

ZHANG Peng¹ LIU Xichuan² ZHOU Zeming² SONG Kun² YANG Pinglü²

¹ Centre of Teaching and Research Support, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210014

² College of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology, Changsha 410005

Abstract: To improve the quality of quantitative precipitation estimation (QPE), the characteristics of local precipitation are analyzed using the measured raindrop size distribution (DSD) data of Nanjing Area in two consecutive summers. The precipitation estimators (PEs) including the relationship of microwave rainfall attenuation and rain rate and the relationship of weather radar intensity and rain rate are calculated based on the DSD data. The relationships obtained are different from ITU-R rain attenuation relationships and commonly used $Z-R$ relationships. The radar $Z-R$ relationship for convective precipitation is $Z=161.63R^{1.55}$ and $Z=227.23R^{1.53}$ for stratiform precipitation. Using these PEs, the rain rate distributions in two rainfall cases of different types are retrieved with a microwave link and a weather radar. The results are as follows. The rainfall is overestimated in stratiform precipitation and underestimated in convective precipitation when using ITU-R rain attenuation relationship. The rain rates are obviously underestimated

^{*} 国家自然科学基金项目(41975030)和江苏省自然科学基金项目(BK20181337)共同资助

2020 年 11 月 24 日收稿; 2021 年 5 月 10 日收修定稿

第一作者: 张鹏, 主要从事大气探测和雷达气象研究. E-mail: radarpeng@126.com

通讯作者: 刘西川, 主要从事大气探测研究. E-mail: liuxc2012@126.com

when using commonly used Z - R relationship. The rain rates retrieved with the rain attenuation relationship and the Z - R relationships obtained from the DSD data are more consistent with the rain rates measured by the rain gauges. The mean absolute errors are reduced, and the correlations are significantly improved. The results show that the accuracy of QPE can be improved effectively by using the local PEs calculated by the DSD data.

Key words: rain attenuation relationship, Z - R relationship, raindrop size distribution, quantitative precipitation estimation (QPE), microwave link, weather radar

引 言

降水与人类生产生活息息相关,定量测量降水(QPE)一直是气象和水文领域的焦点。天气雷达是区域降水监测的有效手段,其利用降水估计关系(PE)即观测量与降水的关系进行定量测量降水,如常用的雨强 R 与反射率因子 Z 间的 Marshall-Palmer 关系 $Z=200R^{1.6}$ (Marshall et al, 1955)、“雷暴”关系 $Z=300R^{1.4}$ (Fulton et al, 1998)等。近年来,利用无线微波链路(ML)实施降水监测受到广泛关注,ML 能够通过测量路径累积衰减,使用衰减系数与降水强度的关系(雨衰关系)测量降水(姜世泰等, 2013),利用雨衰关系反演降水更具鲁棒性,而且 ML 分布广泛,具有无需额外投入的突出优势(Messer et al, 2006)。

微波链路雨衰关系和雷达 PE 关系的准确性是微波链路和雷达 QPE 的关键。然而雨滴谱的时空变化导致雨衰关系和 PE 关系也存在时空变化,不同地区、季节、类型降水中的雨衰关系和 PE 关系存在较大差异(Wilson and Brandes, 1979)。Battan (1973)曾根据气候条件给出过 69 种不同的 Z - R 关系。国际电信联盟(ITU)建议的 ITU-R 模型得到广泛使用,但一些局地的雨衰试验结果与 ITU-R 模型结果差异较大,充分说明雨衰模型参数需要根据地域、气候、滴谱特征进行调整(Baldotra and Hudisara, 2004; van Leth et al, 2018)。

近年来,随着实测雨滴谱数据质量的提升,使用雨滴谱数据分析降水特性的研究取得了较好效果。黄兴友等(2019)使用 Parsivel 激光雨滴谱仪获取了 32 次降雨过程的雨滴谱资料,拟合了雷达反射率因子与降雨强度间的关系,利用衰减参数进行了雷达回波衰减订正试验。沙修竹等(2019)、李力等(2018)对比分析了雨滴谱反演降水强度与雨量计观测降水强度的差异。Mineo et al(2019)利用雨滴谱

数据分析验证了降雨动能与雨强间的关系。濮江平等(2010)利用雨滴谱数据,分析对比了南京地区不同云系降水中雨滴谱分布特征的差异。这些研究都体现出实测滴谱数据在降水特性分析中的有效性。

因此,为得到更为准确的雨衰特性和雷达 PE 关系,本文利用实测雨滴谱数据,统计了南京地区不同类型降水滴谱特征,对微波雨衰关系和天气雷达降水估计关系进行了计算,并在实际降水过程中进行分析验证,从而为定量测量降水等相关研究提供参考。

1 雨滴谱数据

使用南京地区连续两年夏季的实测雨滴谱数据,包括 2014 年 5 月 1 日至 7 月 31 日南京江宁区站点的雨滴谱数据,以及 2015 年 5 月 1 日至 7 月 31 日南京浦口区站点的雨滴谱数据。

1.1 测量方法

所用雨滴谱数据由德国 OTT 公司的 Parsivel 激光降水粒子谱仪获取。Parsivel 雨滴谱仪(Löffler-Mang and Joss, 2000)采用平行激光束进行采样,以光电管阵列为接收传感器,当有降水粒子穿越采样空间时,遮挡物的宽度和穿越时间被仪器自动记录,由此可计算降水粒子的尺度分布和速度。仪器测量的数据共有 32 个尺度测量通道和 32 个速度测量通道,其中粒子尺度测量数据范围为 $0.2 \sim 25$ mm,粒子速度测量数据范围为 $0.2 \sim 20$ m \cdot s $^{-1}$ 。仪器的采样间隔可设为 10 s \sim 2 h,每个采样间隔内的粒子谱测量数据都有 $32 \times 32 = 1024$ 个。滴谱仪连续采样,采样时间设定为 1 min,采样面积为 0.0054 m 2 。

1.2 质量控制

首先对雨滴谱数据进行质量控制,对雨强 < 0.5 mm \cdot h $^{-1}$ 且粒子数少于 10 个的样本,认为其是无

降水或仪器噪声所致,删除;认为偏离 Atlas 经验曲线(Atlas et al,1973) 50%的数据为异常值,进行剔除。由于观测到的对流性降水雨滴最大尺度接近 6 mm(濮江平等,2010),所以剔除直径大于 6 mm 的雨滴数据。经过上述处理,最终得到 14 153 个有效数据样本(每分钟一个样本)。

由于 Parsivel 激光降水粒子谱仪发射的激光是在水平方向上进行雨滴尺度测量,观测到的雨滴直径通常为椭球型雨滴的长轴直径,导致测量值偏大,所以采用 Battaglia et al(2010)的方法对观测数据进行雨滴形变修正,方法如下:

$$D_q = \begin{cases} D_{\text{mea}} & D_{\text{mea}} \leq 1 \text{ mm} \\ (1.075 - 0.075 D_{\text{mea}}) D_{\text{mea}} & 1 \text{ mm} < D_{\text{mea}} \leq 5 \text{ mm} \\ 0.7 D_{\text{mea}} & D_{\text{mea}} > 5 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

式中: D_q 为雨滴等效球形直径, D_{mea} 为 Parsivel 实测雨滴直径。

1.3 样本统计

根据雨滴谱数据,可采用阶矩法计算相关降水物理量,将第 i 阶矩量定义为:

$$M_i = \int_0^{\infty} D^i N(D) dD \quad (2)$$

式中: M 的下标表示阶数, D 为雨滴直径, $N(D)$ 为直径为 D 的雨滴数。降水粒子数密度 n 、雨强 R 、雷达反射率因子 Z 分别对应 0、3、6 阶矩量:

$$n = \int_0^{\infty} N(D) dD \quad (3)$$

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} D^3 N(D) V(D) dD \quad (4)$$

$$Z = \int_0^{\infty} D^6 N(D) dD \quad (5)$$

根据 Atlas and Ulbrich(1977)的研究,雨滴降落末速:

$$V(D) = 3.778 D^{0.67} \quad (6)$$

基于实际雨滴谱数据,利用式(5),可得粒子数和雷达反射率因子,将式(6)代入式(4),即可计算雨强值。将以下标准作为降水分类规则(Chen et al, 2013):

(1)连续 10 min 内,平均雨强 $> 0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,标准差 $< 1.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为层状云降水;

(2)平均雨强 $> 5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,标准差 $> 1.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为对流性降水;

(3)除以上两类之外,即 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < \text{平均雨强} < 5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,标准差 $> 1.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,或平均雨强 $> 5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,标准差 $< 1.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水样本,即弱雨高标准差或强降雨低标准差,归为其他类型降水,主要应为弱对流性降水和混合性降水。

按照以上标准,在 14 153 个有效滴谱样本中判别出 7 278 个层状云降水样本、4 136 个对流性降水样本、2 739 个其他类型降水样本,各类型样本数量分布如表 1 所示。

从表 1 中可以看到,2015 年 5—7 月浦口地区降水时次多于 2014 年 5—7 月江宁地区的降水时次,相比于层状云和其他型降水,对流性降水时次增加量略大。不同雨强对应的样本数量比例如图 1 所示。

表 1 雨滴谱数据的降水类型分布(单位:min)

Table 1 The precipitation type distribution of DSD data (unit: min)

降水过程	层状云降水	对流性降水	其他型降水	合计
江宁 2014 年 5—7 月	2 982	1 362	998	5 342
浦口 2015 年 5—7 月	4 296	2 774	1 741	8 811
合计	7 278	4 136	2 739	14 153

由图 1 可见,绝大部分降水集中在 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下,整体上,降水样本数随雨强增大而迅速减小,在雨强 $> 12 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 后开始出现震荡,且雨强越大,波动越强。其中低于 $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水样本占比为 77.88%,高于 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水样本占比为 6.17%,雨强整体高于张洪胜等(2017)对 2010—2014 年南京地区全年滴谱数据的统计结果,而与

Chen et al(2013)统计的梅雨锋降水中雨强分布相似。

各降水类型的统计量见表 2,可见所有类型降水标准差($10.95 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)与雨强均值($5.11 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)的比值为 2.14,与 Sauvageot(1994)发现的陆地降水中雨强标准差与平均值之间的比值(约为 2.24)的结论非常相近。

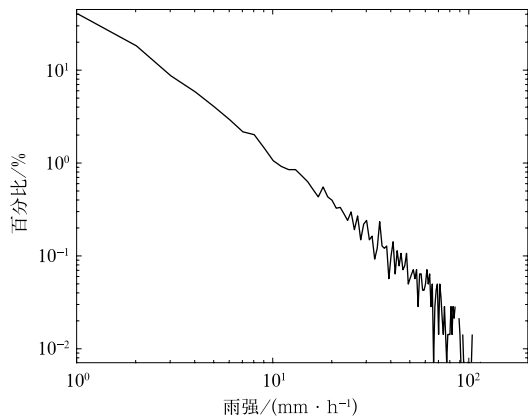


图 1 雨滴谱数据的雨强分布
Fig. 1 The rain rate distribution of DSD data

2 微波雨衰关系分析

2.1 计算方法

根据微波传输理论,路径微波衰减系数 γ_{rain} (dB/km)可表示成为如下形式(姜世泰等,2013):

$$\gamma_{\text{rain}} = 0.434 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} C_{\text{ext},f} \cdot \bar{N}(D_e) dD_e \quad (7)$$

式中: D_e 是雨滴的等效直径, $\bar{N}(D_e)$ 为路径的平均雨滴谱分布, $C_{\text{ext},f}$ 为微波偏振频率 f 时的雨滴消光截面。可见,在获得雨滴谱分布后,计算微波雨衰的关键在于计算雨滴消光截面,而消光截面是粒子对电磁波衰减能力的度量,其大小与粒子尺度、形状、

表 2 各类型降水统计量

Table 2 Statistics of all types of precipitation

降水类型	雨强/(mm · h ⁻¹)			反射率因子/dBz		
	均值	最大值	标准差	均值	最大值	标准差
所有类型	5.11	247.49	10.95	26.76	62.83	9.18
层状云	1.58	12.15	1.40	24.57	44.19	5.68
对流性	17.64	247.49	18.14	38.73	62.83	6.64
其他类型	1.47	16.72	2.04	20.96	47.91	7.47

环境温度、微波频率和偏振状态有关。目前计算粒子消光截面的方法较多,有 Mie 散射理论、T 矩阵理论等,研究表明使用 T 矩阵理论计算非球形粒子的散射衰减特性精度较高(徐飞等,2005)。因此本文采用 T 矩阵理论计算不同波长的雨滴衰减截面,计算方法详见 Waterman(1969)。由于雨滴的复折射指数与温度有关,因此需要考虑温度的影响。根据温度对衰减的影响的相关研究(刘西川等,2018),发现在 $-20^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 范围内,温度对雨滴衰减的影响可近似忽略,因此本文将 20°C 作为 T 矩阵计算的输入参数。

2.2 ITU-R 雨衰模型

国际电信联盟(ITU)建议的 ITU-R 模型,适用于 55 GHz 频率以下的微波雨致衰减预测。该模型中衰减系数 γ_{rain} (dB/km)与雨强 $R(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$ 为幂律关系:

$$\gamma_{\text{rain}} = kR^{\alpha} \quad (8)$$

ITU-R 建议书还给出了线极化和水平链路条件下,随频率变化的系数 k 和 α 在部分整数频点的取值,其他频点下的系数取值可采用插值方法(k 采用对数插值, α 采用线性插值)。

2.3 实测雨衰特性分析

使用非线性拟合方法,根据实测雨滴谱数据拟合雨致衰减与雨强的幂律关系(式 8),得到系数 k 和 α 随频率的取值分布,并与 ITU-R 雨衰模型建议的参数取值进行比较,垂直偏振条件下各种降水型雨衰关系的系数对比结果如图 2 所示。

由图 2 可见,由于 ITU-R 雨衰模型为达到一定的应用普适性,对雨滴谱分布特征和粒子散射特性进行了一定简化和假设,导致 ITU-R 雨衰模型建议的参数取值(k 和 α)与实测雨滴谱数据拟合得到的雨衰模型系数并不相同,其中系数 k 的差异相对较小,在层状云降水和其他类型降水时,实测数据拟合得到的系数 k 小于 ITU-R 建议的 k 值,差异随频率增加而增加。而在对流性降水中,实测数据拟合的 k 值先低于 ITU-R 建议值,在 9 GHz 之后高于 ITU-R 建议值,总体上差异小于层状云降水和其他类型降水。相比于系数 k ,系数 α 的差异较大,在层状云降水和其他类型降水中,实测数据拟合的系数 α 值先低于 ITU-R 建议取值,在 6 GHz 和 9 GHz 之后高于 ITU-R 建议取值。对流性降水中的 α 值差异也很大,实测数据拟合的系数 α 值先高于 ITU-R 建议取值,在 11 GHz 之后低于 ITU-R 建议取值,在 6

GHz处差异最大。所有降水样本数据拟合的系数

值与对流性降水相似。

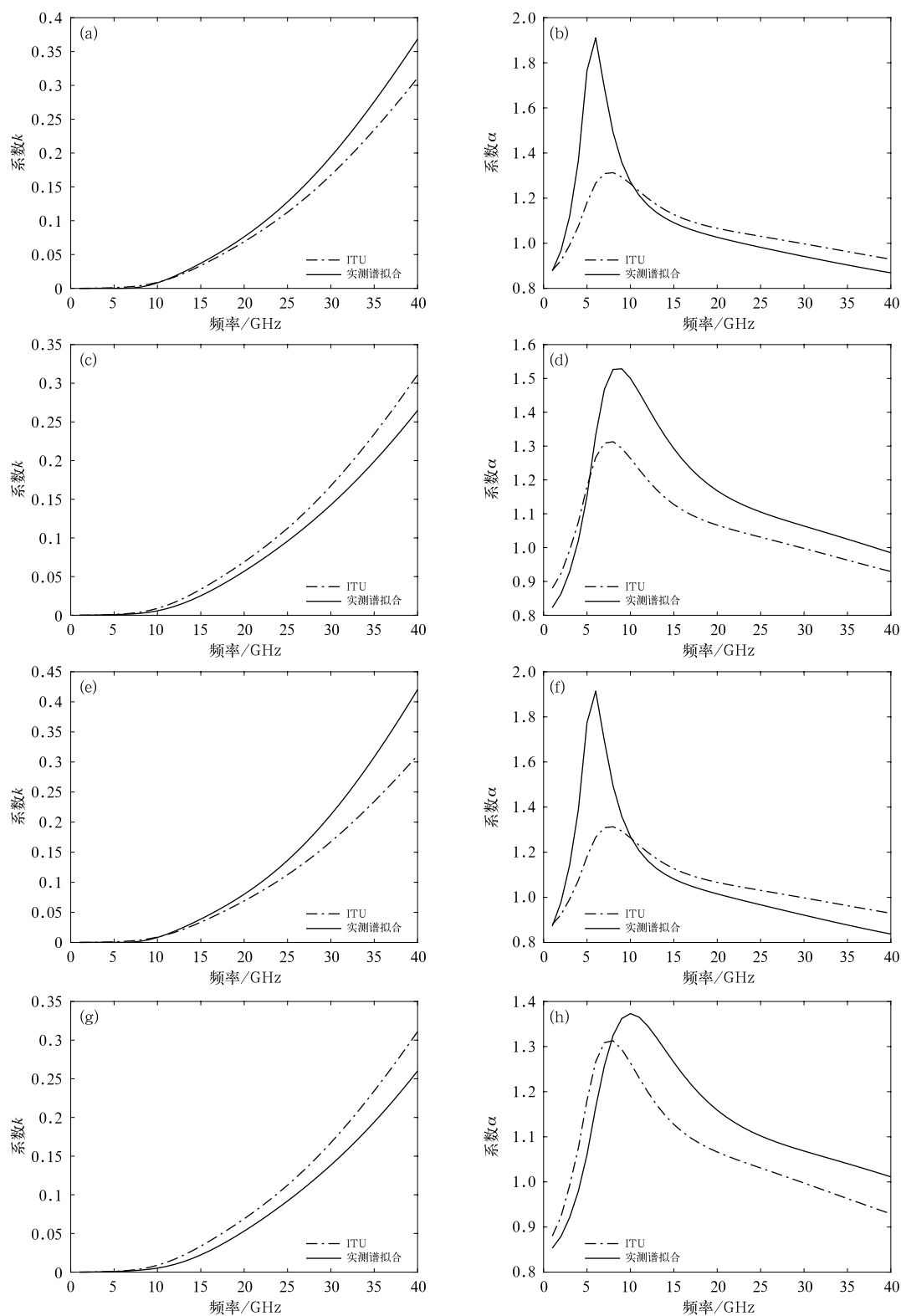


图2 垂直偏振条件下各种降水型的雨衰关系系数 k (a,c,e,g)和 α (b,d,f,h)分布

(a,b)全部类型降水,(c,d)层状云降水,(e,f)对流性降水,(g,h)其他型降水

Fig. 2 The parameters k (a, c, e, g) and α (b, d, f, h) of rain-attenuation relationship of different precipitation types under vertical polarization condition

(a, b) all type precipitation, (c, d) convective precipitation, (e, f) stratiform precipitation, (g, h) other type precipitation

由于实测数据拟合得到的雨衰模型系数与 ITU-R 建议值不同,所以使用 ITU-R 雨衰模型由衰减系数反算降水强度必然存在误差,图 3 显示了在微波频率为 8 GHz、垂直极化条件下,分别使用实测数据拟合的雨衰模型和 ITU-R 雨衰模型,由衰减系数反算雨强的结果。

显然,使用 ITU-R 雨衰模型和实测数据拟合的雨衰模型,由衰减系数反算雨强的结果存在差异。微波垂直极化与水平极化条件下,雨强反演偏差分布基本相同。具体地说,层状云降水条件下,ITU-R 反演结果高估雨强,除层状云降水之外的其他降水类型条件下低估,所有类型降水中总体表现为低估雨强。ITU-R 反演雨强的偏差随雨强增大而增大,高估层状云降水与低估对流性降水的偏差大致相同,而低估其他类型降水的偏差最大。因此,使用 ITU-R 雨衰模型将带来较大误差,必须使用本地化的雨衰模型,才能获得较高的降水反演准确度。

3 天气雷达降水估计关系分析

雷达反射率因子 Z 和雨强 R ,二者之间存在如

下关系:

$$Z = aR^b \quad (9)$$

转换为 dB 单位,即两边取对数可得:

$$dBz = b \cdot dBR + 10\lg a \quad (10)$$

式中: $dBz = 10\lg Z$, $dBR = 10\lg R$ 。转换为 dB 单位后, dBz 与 dBR 呈线性关系,可用线性拟合得到系数 a 、 b 的值。实测滴谱数据拟合结果如图 4 所示。

可见,实测滴谱数据拟合得到的 Z - R 关系与常用层状云降水关系 $Z = 200R^{1.6}$ (Marshall et al, 1955)或对流云降水关系 $Z = 300R^{1.4}$ (Fulton et al, 1998)均有差异,使用默认降水估测关系根据雷达反射率因子计算雨强将导致误差。

4 试验与分析

在实际降水过程中应用和检验了基于实测滴谱数据拟合的雨衰关系和 PE 关系。

4.1 实验设备

使用 1 部 S 波段天气雷达、1 条微波链路和 8 个雨量计进行试验分析,各设备相对位置如图 5 所

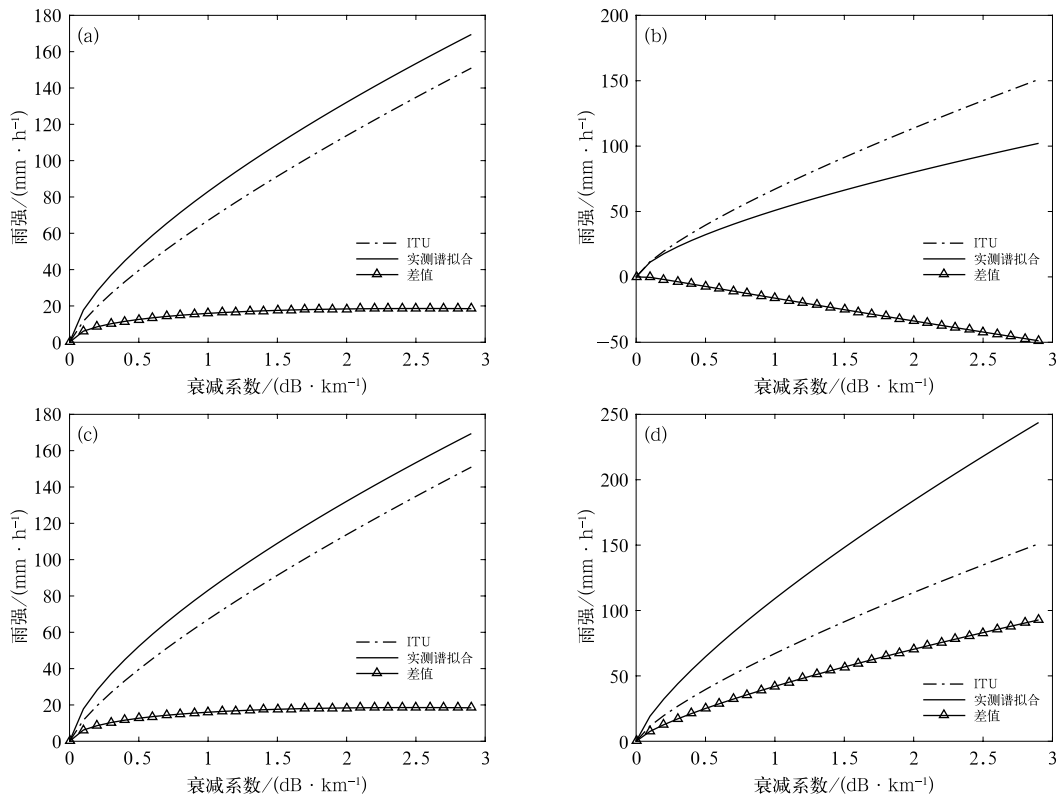


图 3 实测滴谱拟合雨衰模型与 ITU-R 模型反演降水对比
(a)全部类型降水,(b)层状云降水,(c)对流性降水,(d)其他类型降水

Fig. 3 Comparison of rain rates derived by rain-attenuation model fitted by measured DSD data and ITU-R model
(a) all type precipitation, (b) stratiform precipitation, (c) convective precipitation, (d) other type precipitation

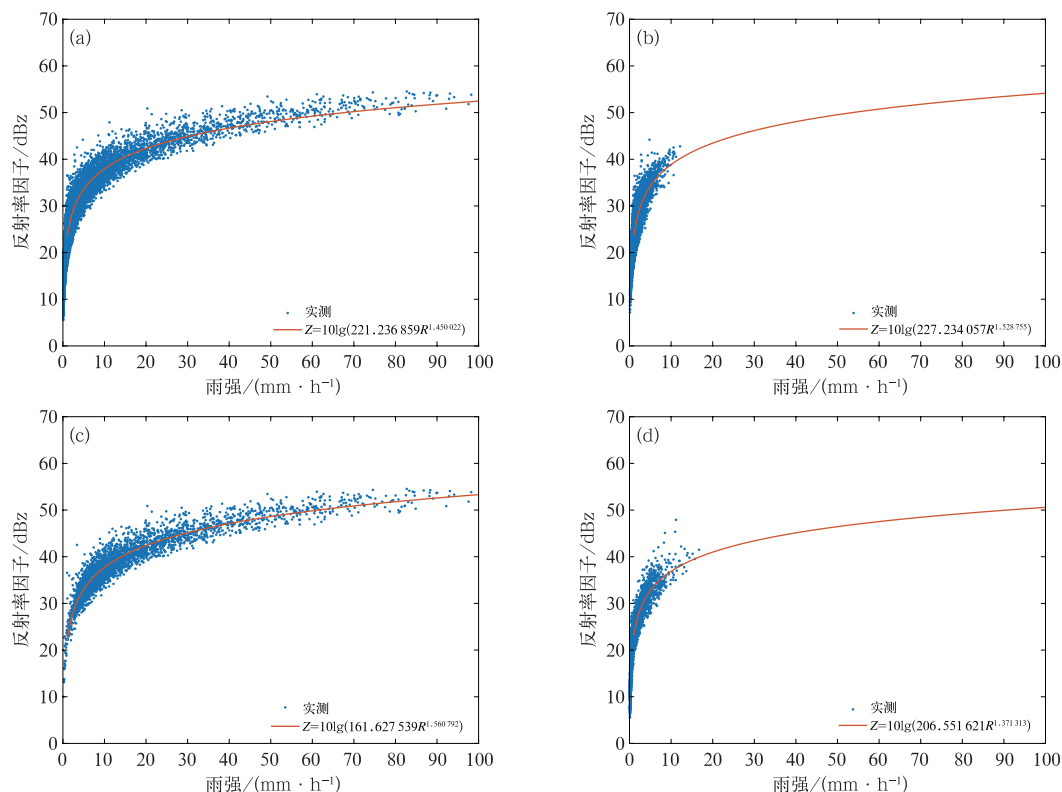


图 4 同图 3, 但为实测滴谱拟合的 Z-R 关系

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for Z-R relationship fitted with measured DSD data

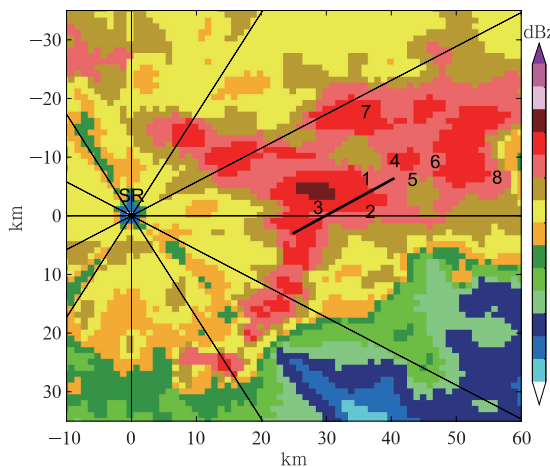


图 5 2016 年 6 月 1 日 S 波段天气雷达

0.5°仰角 PPI 强度回波

(SR: S 波段天气雷达, 黑线: 微波链路, 数字: 雨量计)

Fig. 5 Reflectivity PPI at elevation 0.5° of the S-band radar on 1 June 2016

(SR: S-band radar, black line: microwave link, number: rain gauge)

示。微波链路长为 24.05 km, 发射频率为 7.7 GHz,

垂直极化。相对于 S 波段天气雷达, 微波链路发射端处在径向距离为 25 km、方位 97°处, 接收端处在距离 41 km、方位 81°处, 共对应 S 波段雷达 17 个距离库。

该微波链路为业务用通信链路, 接收端实时记录接收功率, 精确到 0.1 dB。为得到链路路径衰减, 首先应确定微波链路的基准电平, 即链路路径无降水时的接收功率。在本文试验中, 将距离微波链路最近的雨量计 1 和雨量计 2 作为干/湿指示器, 当任一雨量计显示某时刻有降水, 即认定该时刻为降水时刻, 基准电平为最后“干”时刻的接收功率。则链路路径总衰减量可以通过比较接收功率和基准电平而得到, 进而由总衰减量除以链路长度得到链路路径平均衰减系数。

为分析微波链路反演降水的效果, 选择离链路较近(距离链路中点距离 < 20 km)的 8 个雨量计, 图 5 中数字顺序即为各雨量计距链路中心点的距离排序(由近及远)。8 个雨量计相对 S 波段雷达的距离和方位以及与链路中点的距离见表 3。

表 3 雨量计相对于雷达和链路的位置

雨量计	1	2	3	4	5	6	7	8
雷达距离/km	36	36	28	41	43	47	40	51
雷达方位/(°)	79	88	86	76	81	78	62	82
链路中点距离/km	2.70	3.39	7.13	7.29	7.78	12.84	14.18	16.03

4.2 降水过程 I

4.2.1 降 水

2016 年 6 月 1 日,南京地区发生了一次暴雨过程,降水从 08—13 时持续 5 h,以雷达完成一个体积扫描的时间(6 min)为 1 个时次,此次降水持续了 50 个时次,降水由强转弱。第 9 时次的 S 波段雷达强度回波如图 5 所示。该时次回波分布不均匀,回波边缘清晰,强中心强度强,最大强度达到 55 dBz,雨量计测量的最大雨强达到了 $70\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。综合分析各时次多仰角回波图像和雨量计实测雨量,可以判断此次降水过程的前 14 个时次主要为对流性降水,之后转变为层状云弱降水为主。

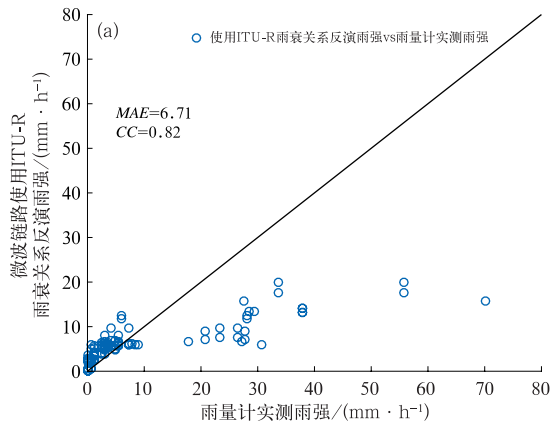
4.2.2 微波链路反演降水

由于此次降水过程为对流性降水转为层状云弱降水为主,因此,对于微波链路反演雨强,本次降水过程的前 14 个时次,使用根据雨滴谱计算得到的 7.7 GHz 垂直极化条件下的对流性降水雨衰模型:

$$\gamma_{\text{rain}} = 0.0005R_{\text{ML}}^{1.6938} \quad (11)$$

式中: γ_{rain} 和 R_{ML} 分别为微波链路平均衰减系数和平均降水强度。对之后的 36 个匹配时次,使用由雨滴谱统计得到的层状云降水雨衰模型:

$$\gamma_{\text{rain}} = 0.0025R_{\text{ML}}^{1.5265} \quad (12)$$



同时使用 ITU-R 雨衰关系反演降水,在电磁波垂直极化、频率为 7.7 GHz 条件下,ITU-R 雨衰关系为:

$$\gamma_{\text{rain}} = 0.00395R_{\text{ML}}^{1.31} \quad (13)$$

图 6 显示了微波链路反演降水与距离链路最近的雨量计 1 和雨量计 2 实测降水的对比。

绘制微波链路反演降水与雨量计 1 和雨量计 2 实测降水的散点(图 7)。

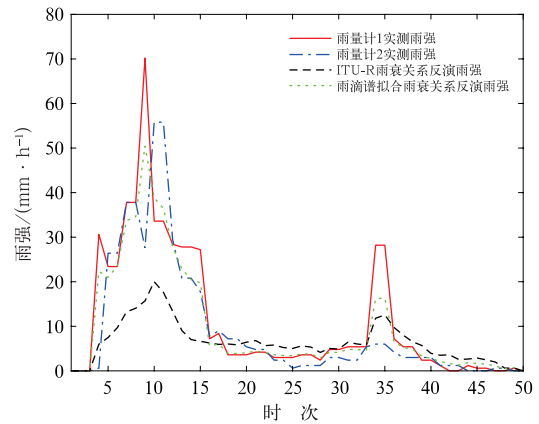


图 6 微波链路反演降水与雨量计实测降水的对比(降水过程 I)

Fig. 6 Comparison of the rain rates in precipitation Case I derived by microwave link and rain gauge

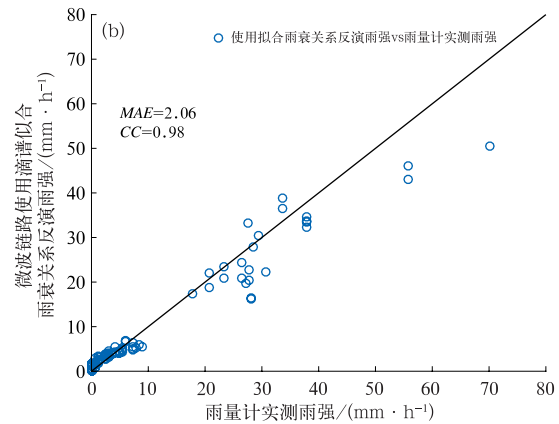


图 7 雨量计实测雨强与微波链路使用(a)ITU-R 雨衰关系和(b)滴谱拟合雨衰关系反演雨强的散点(降水过程 I)

Fig. 7 Scatter plots of the rain rates measured in precipitation Case I by rain gauges against those derived by microwave link using (a) ITU-R model and (b) rain-attenuation relationship fitted with DSD data

由图 7 可见,使用 ITU-R 雨衰关系反演雨强存在着低估对流性降水而高估层状云降水的问题,特别是在较强对流性降水时严重低估。而使用雨滴谱拟合雨衰关系反演的雨强与雨量计实测雨强更加接近,平均绝对误差(MAE)降至 2.06,相关系数(CC)提高至 0.98,低估对流性降水和高估层状云降水的问题得到较大改善。值得注意的是,此次降水过程第 15 时次之后整体上以层状云降水为主,但在第 35 时次雨量计 1 位置处仍为弱对流性降水,导致了一定的反演误差。

4.2.3 雷达反演降水

对于雷达反演降水,由于使用的是 S 波段雷达最低层(仰角 0.5°)PPI 反射率因子数据,所以在反演降水之前,首先进行非气象回波消除以及滤波处理,以减少非气象回波和噪声的影响。对于本次降水过程的前 14 个时次,使用对流性降水 PE 关系 $Z = 161.63R^{1.55}$,之后的 36 个匹配时次,使用层状云降水 PE 关系 $Z = 227.23R^{1.53}$ 。所得降水反演的与常用层状云 PE 关系的反演结果以及雨量计实测降水进行比较。图 8 为使用常用 PE 关系、雨滴谱拟合 PE 关系反演的雨强与雨量计实测雨强的散点图。

可见,使用常用层状云 PE 关系($Z = 200R^{1.6}$)反演降水存在着低估降水的问题,特别是雨强较大时更为明显。而使用雨滴谱拟合 PE 关系反演的雨强与雨量计实测雨强更加接近,MAE 降至 2.74,

CC 提高至 0.93,低估降水问题虽仍然存在,但已得到较大改善,充分表明使用滴谱拟合 PE 关系反演雨强较常用 PE 关系更为准确。

4.3 2016 年 6 月 12 日降水过程 II

4.3.1 降水

2016 年 6 月 12 日南京地区的一次降水过程,分布范围广,持续时间长,从 00 时到接近 10 时共约 10 h,将 S 波段天气雷达进行一次体积扫描的时间(6 min)作为 1 个时次,共对应于 95 个时次。整个降水过程整体呈现出混合性强降水特征,回波分布范围广,强度较强且分布不均匀,强中心明显。但校准区域处在整个降水区域的边缘位置,雷达回波强度相对较弱,分布很不均匀。从雨量计测值看,实测雨强较弱,通常低于 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,且随时间和位置的分布不均匀,降水在校准区域内各个时次均表现出这些特征,所以,校准区域内的降水主要为弱对流性降水。

4.3.2 微波链路反演降水

由于本次降水过程为对流性弱降水,所以使用根据滴谱计算得到的 7.7 GHz 垂直极化条件下的其他类型降水雨衰模型(式 14)以及 ITU-R 雨衰关系(式 13),根据微波链路路径衰减反演降水。图 9 显示了微波链路反演降水与雨量计 1 和雨量计 2 实测降水均值的对比。

$$\gamma_{\text{rain}} = 0.0023R_{\text{ML}}^{1.3044} \quad (14)$$

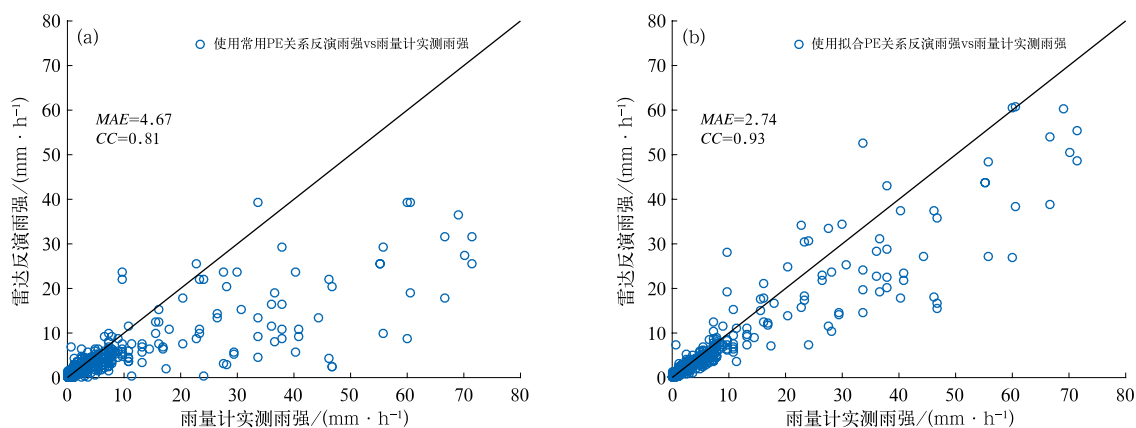


图 8 雨量计实测雨强与天气雷达使用(a)常用 PE 关系和
(b)雨滴谱拟合 PE 关系反演雨强的散点

Fig. 8 Scatter plots of the rain rates measured by rain gauges against those estimated by the radar using (a) default PE relationship and (b) the PE relationship fitted with DSD data

由图 9 可见,微波链路反演的降水与雨量计实测降水随时间的变化趋势大体一致,但即便是在弱对流性降水中,微波链路使用 ITU-R 雨衰关系反演降水仍存在明显的低估问题。绘制微波链路反演降水与雨量计 1 和雨量计 2 实测降水均值的散点图(图 10)。

由图 10 可见,使用滴谱拟合雨衰关系反演的雨强与雨量计实测雨强更加接近,MAE 降至 0.50,CC 提高至 0.89,低估弱对流性降水的问题得到改善。

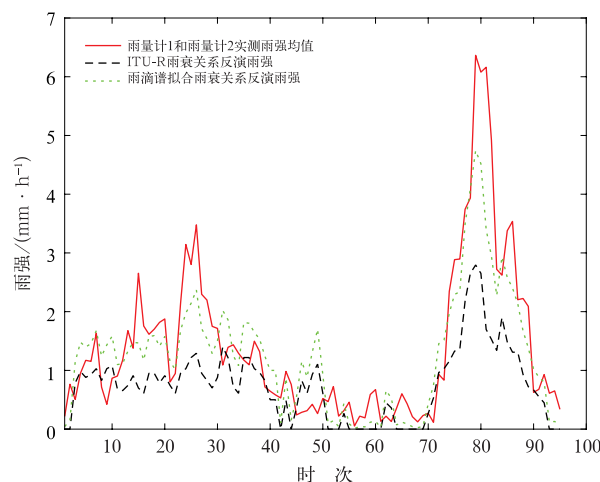


图 9 同图 6, 但为降水过程 II

Fig. 9 Same as Fig. 6, but for precipitation Case II

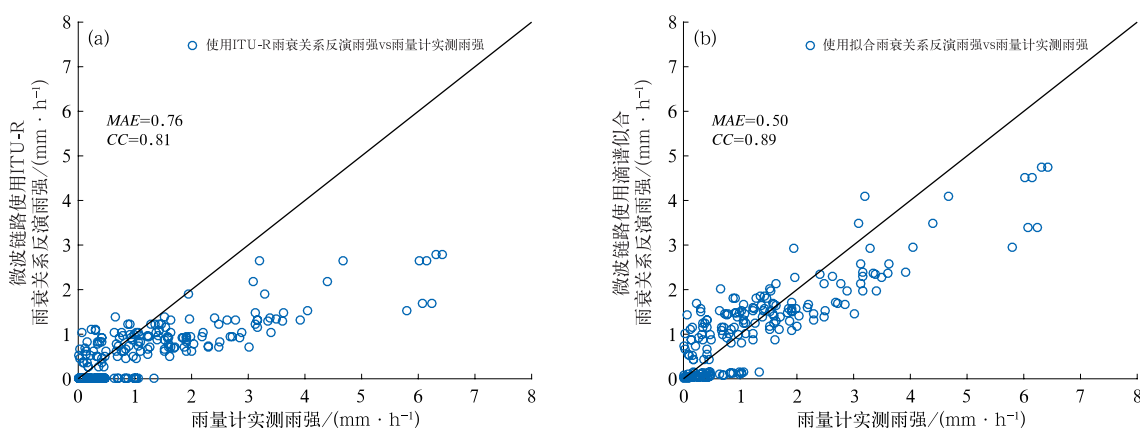


图 10 同图 7, 但为降水过程 II

Fig. 10 Same as Fig. 7, but for precipitation Case II

5 结论与讨论

本文统计分析了南京地区夏季实测雨滴谱数据,区分降水类型计算了雨衰关系和雷达降水估计关系,并在两次降水过程中进行了应用,与 ITU-R 雨衰关系和常用降水估计关系的降水反演结果进行了比较,得到以下结论:

(1)雨滴谱数据拟合的雨衰关系与 ITU-R 建议模型存在差异,其中系数 k 的差异相对较小,系数 α 间的差异较大。对于层状云降水和其他类型降水(弱对流性降水和混合性降水),实测数据拟合得到的系数 k 小于 ITU-R 建议的 k 值,系数 α 值先低于后高于 ITU-R 建议值。而对于对流性降水,雨滴谱数据拟合的 k 值先低于后高于 ITU-R 建议值,雨滴

谱数据拟合的系数 α 值先高于后低于 ITU-R 建议取值。

(2)在一次强对流性降水转层状云降水的降水过程和一次弱对流性降水过程中,根据拟合得到的雨衰关系,使用微波链路得到的路径衰减进行了降水反演,并与 ITU-R 雨衰关系的反演结果和雨量计实测值进行了比较。结果表明,使用 ITU-R 雨衰关系反演降水存在高估层状云降水而低估对流性降水的问题,而使用滴谱拟合雨衰关系反演的雨强与雨量计实测雨强更加一致,平均绝对误差降低,相关性提高。

(3)滴谱数据拟合的 $Z-R$ 关系为:全部类型降水 $Z=221.24R^{1.45}$ 、层状云降水 $Z=227.23R^{1.53}$ 、对流性降水 $Z=161.63R^{1.55}$ 、其他类型降水 $Z=206.55R^{1.37}$,相比于常用的层状云降水 $Z=200R^{1.6}$

关系,使用拟合 PE 关系反演降水与雨量计实测值更加接近。

参考文献

- 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).
- 姜世泰,高太长,刘西川,等,2013. 基于微波链路的降雨场反演方法研究[J]. 物理学报,62(15):154303. Jiang S T, Gao T C, Liu X C, et al, 2013. Investigation of the inversion of rainfall field based on microwave links[J]. Acta Phys Sin, 62(15):154303(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).
- 刘西川,宋堃,高太长,等,2018. 复杂大气条件对微波传播衰减的影响研究[J]. 电子与信息学报,40(1):181-188. Liu X C, Song K, Gao T C, et al, 2018. Research on the effect of complex atmospheric condition on microwave propagation attenuation [J]. J Electron Inf Technol, 40(1):181-188(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]. Sci Meteor Sin, 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 rain drop disdrometer[J]. Meteor Mon, 45(11):1569-1578(in Chinese).
- 徐飞,顾松山,陈玉林,2005. 用 T 矩阵方法计算超椭球粒子的电磁散射特性[J]. 南京气象学院学报,28(6):815-820. Xu F, Gu S S, Chen Y L, 2005. Computation of scattering features of hyper ellipsoids using the T-matrix method[J]. J Nanjing Inst Meteor, 28(6):815-820(in Chinese).
- 张洪胜,何宏让,张云,等,2017. 南京地区降水雨滴谱拟合模型的参数特征分析[J]. 气象与环境科学,40(3):71-78. Zhang H S, He H R, Zhang Y, et al, 2017. Parameter characteristic analysis of raindrop spectrum fitting models in Nanjing[J]. Meteor Environ Sci, 40(3):71-78(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.
- Atlas D, Ulbrich C W, 1977. Path- and area-integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3 cm band[J]. J Appl Meteor Climatol, 16(12):1322-1331.
- Baldotra A K, Hudiara I S, 2004. Rain attenuation statistics over terrestrial microwave link at 19.4 GHz at Amritsar [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 52(6):1505-1508.
- Battaglia A, Rustemeier E, Tokay A, et al, 2010. Parsivel snow observations; a critical assessment[J]. J Atmos Ocean Technol, 27(2):333-344.
- Battan L J, 1973. Radar Observation of the Atmosphere[M]. Chicago: University of Chicago Press:105-137.
- Chen B J, Yang J, Pu J P, 2013. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in Eastern China [J]. J Meteor Soc Jpn, 91(2):215-227.
- Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D J, et al, 1998. The WSR-88D rainfall algorithm[J]. Wea Forecasting, 13(2):377-395.
- Löffler-Mang M, Joss J, 2000. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors[J]. J Atmos Ocean Technol, 17(2):130-139.
- Marshall J S, Hitschfeld W, Gunn K L S, 1955. Advances in radar weather[J]. Adv Geophys, 2:1-56.
- Messer H, Zinevich A, Alpert P, 2006. Environmental monitoring by wireless communication networks[J]. Science, 312(5774):713.
- Mineo C, Ridolfi E, Moccia B, et al, 2019. Assessment of rainfall kinetic-energy-intensity relationships[J]. Water, 11(10):1994.
- Sauvageot H, 1994. The probability density function of rain rate and the estimation of rainfall by area integrals[J]. J Appl Meteor Climatol, 33(4):1255-1262.
- van Leth T C, Overeem A, Uijlenhoet R, et al, 2018. A measurement campaign to assess sources of error in microwave link rainfall estimation[J]. Atmos Meas Tech, 11(8):4645-4669.
- Waterman P C, 1969. New formulation of acoustic scattering[J]. J Acoust Soc Amer, 45(6):1417-1429.
- Wilson J W, Brandes E A, 1979. Radar measurement of rainfall-a summary[J]. Bull Amer Meteor Soc, 60(9):1048-1060.