

南昌地区雨滴谱特征及雷达定量降水估算研究

康凡

江西信息应用职业技术学院, 江西 南昌 330001

DOI: 10.61369/SSSD.2025020043

摘 要 : 南昌市, 属于亚热带季风气候。利用南昌2018年6月到9月的 Parsivel 观测数据, 采取两种不同的方法区分对流云和层状云降水, 比较了不同分类方法中降水粒子谱的微物理特征量的区别。并用 Gamma 函数对粒子谱进行了拟合。Gamma 分布描述层状云降水谱的分布效果要优于对流云。在对流云中, 小粒子的浓度和谱宽要大于层状云, 含水量也更高。同时也获得了谱参数之间的约束关系。总体的 Z-R 关系, 南昌地区 $Z=175.67R^{1.37}$ 。

关 键 词 : 降水分类; 雨滴谱特征; 雷达定量降水估计; 南昌地区

Study on Raindrop Spectrum Characteristics and Radar Quantitative Precipitation Estimation in Nanchang Area

Kang Fan

Jiangxi Vocational and Technical College of Information Application, Nanchang, Jiangxi 330001

Abstract : Nanchang belongs to the subtropical monsoon climate. Using the Parsivel observation data of Nanchang from June to September 2018, two different methods were adopted to distinguish convective and stratiform cloud precipitations. The microphysical characteristic quantities of precipitation particle spectra in different classification methods were compared, and the particle spectra were fitted with the Gamma function. The Gamma distribution describes the precipitation spectrum of stratiform clouds better than that of convective clouds. In convective clouds, the concentration and spectral width of small particles are larger than those of stratiform clouds, and the water content is also higher. Meanwhile, the constraint relationships between spectral parameters were obtained. The overall Z-R relationship in Nanchang area is $Z=175.67R^{1.37}$.

Keywords : precipitation classification; raindrop spectrum characteristics; radar quantitative precipitation estimation; nanchang area

引言

(一) 研究目的与意义

有大量研究结果表明雨滴谱分布不仅仅在某一特定的降水水中会因为时间和空间的不同表现出差异, 这种差异也存在于在不同的降水类型和气候区中^[1,2]。雷达气象中降水的精确测量是十分重要的, Z-R 关系与雨滴谱的分布情况有关^[3], 需要研究不同地区的 DSD 特征来提高雷达定量降水估计^[4]。雨滴形状主要由流体静压, 表面张力, 空气空气动力学压强决定, 在如碰撞-聚并, 破碎, 凝结, 蒸发, 上升下沉气流, 水平风切变等等过程中会发生形状, 大小, 数量上的改变^[5]。雨滴谱反应了降水的结构特征, 通过对雨滴谱的研究可以量化降雨的微物理过程^[6]。雨滴谱的研究对于土壤的侵蚀, 污染物的扩散具有重要的研究意义^[6]。此外雨滴谱的研究在在通信方面也有巨大意义, 因为雨滴会对信号产生吸收和散射干扰作用^[7]。南昌位于中国江西省中部偏北, 属于亚热带季风气候区, 年降水量约 1500~1700 毫米, 降水特征受季风环流、地形和天气系统影响显著。通过该地区降水资料的研究, 可以更好的了解不同类型降水的特点, 改进雷达估计降水算法。

(二) 国内外研究进展

描述雨滴粒径和浓度分布情况的模型主要是 M-P 分布和 Gamma 分布两种。M-P 分布在描述大雨滴和小雨滴的分布上与真实的降水特征存在较大的差异。Ulbrich 提出用一个三参数化的 Gamma 分布来描述雨滴的分布情况, Gamma 分布可以很好地描述 DSD 的分布情况, 来描述雨滴谱的分布, 为截断参数, μ 为形状参数, Λ 为斜率参数, $\mu > 0$ 时代表曲线上凸, $\mu < 0$ 时代表曲线下凹。当 $\mu = 0$ 时方程就简化成了指数分布的形式, 即 M-P 分布。并且这三个参量并不是相互独立的。Milbrandt and Yau 研究了 μ 对于水滴沉降和增长

的微物理过程的影响。降水类型一般分为两类：对流云降水和层状云降水，其形成与不同的微物理过程有关^[2]。Bringi et al^[1]提出了大陆性对流和海洋性对流的概念，他在研究中发现不同地区的对流云雨滴的大小数量分布上存在差异，相对于大陆的对流降水，海洋附近的降水中较小粒子的浓度更高。Bumke and seltmann却在研究中发现海洋和大陆的雨滴谱分布差距很小。

（三）本文研究内容与目标

通过对南昌地区2018–2019年夏季雨滴观测资料的分析，以期了解该地区层状、对流降水之间雨滴谱特征的差异，更好地理解降水的微物理过程，为改进定量降水估计提供参考。文章的第二部分将会讲述所用到的数据、处理方法以及雨型的分类方法。第三部分则是雨滴谱的Gamma分布拟合，雨滴微物理特征的分析以及微物理量之间的相互关系，第四章是雨强R和雷达反射率因子Z的拟合，并和标准Z-R关系进行比较。第五章为本文内容的概括总结和讨论。

一、仪器和方法

（一）使用仪器和数据说明

本次研究中使用的仪器是德国OTT Hydromet公司生产的Parsivel雨滴测量仪。其工作原理是能发射水平光束的激光传感器。当激光束中没有粒子通过时，接收器接受到的电压为最大电压。当粒子穿过激光束时会遮挡部分的激光，导致接收到的电压发生变化。通过电压的变化情况测得粒子的直径大小，再根据激光信号被遮挡的时间计算出粒子的下落速度。测量的液态降水粒子尺度范围为0.2~5mm，对应速度范围0.2~20m s⁻¹，各自分为32档。

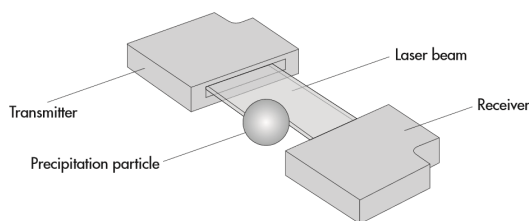


图 1.1 Parsivel 工作原理示意图 (图片源自 Parsivel 使用说明书)

（二）数据处理方法

由于低信噪比的原因，剔除前两档粒子。同时因为边界效应的存在，粒子的采样有效面积会根据粒子直径发生变化，有效采样面积为 $180\text{mm} \times (30 - 0.5 \times D_i)$ ，其中 D_i 为对应的粒子直径。

如果粒子只有一部分落在激光束中，测得的粒子会被误以为是直径更小的粒子，但是具有比同尺寸粒子更快的下落速度。同时由于大风的影响，大粒子会产生产生不真实的落速。为了获得更加可信的数据，我们将使用下落速度——直径经验公式（此处采用的公式为 $V = 9.65 - 10.3e^{-0.06D}$ ，V为下落速度，单位m s⁻¹，D为粒子直径，单位mm。），剔除落在经验公式60%误差范围外的粒子和并采用Friedrich et al^[21]的提议舍去直径超过8mm的大粒子。

（三）降水类型的区分

为了提高获取的观测资料的质量，我们将雨强大于0.002mm h⁻¹作为降水开始的依据，降水时间不足30分钟的数据给予舍去。降水间隔在一个小时或以上则认为是两场独立的降水^[15]。

对于降水类型的区分，这里采用了Bringi et al方法，暨基

于雨强的时间序列，对于第i分钟的样本，若在i-5~i+5分钟之间的11个样本雨强均小于10mm h⁻¹则认为第i分钟的降水是层状降水，反之归为对流性降水。

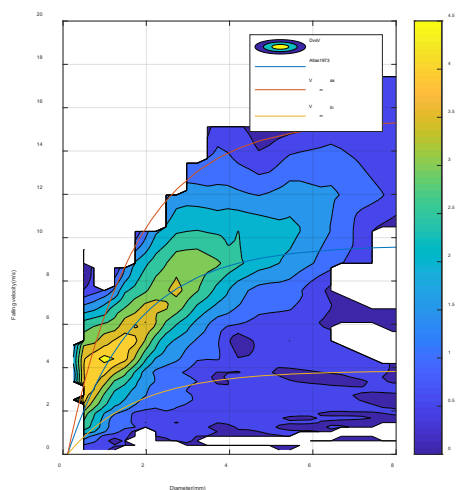


图 2.1 粒子直径 - 速度分布图

（图中中间的蓝线代表的是Atlas et al提出的粒子直径—落速的经验曲线，上方红线和下方的黄线分别代表与标准曲线偏离60%的界限。）

二、雨滴谱特征

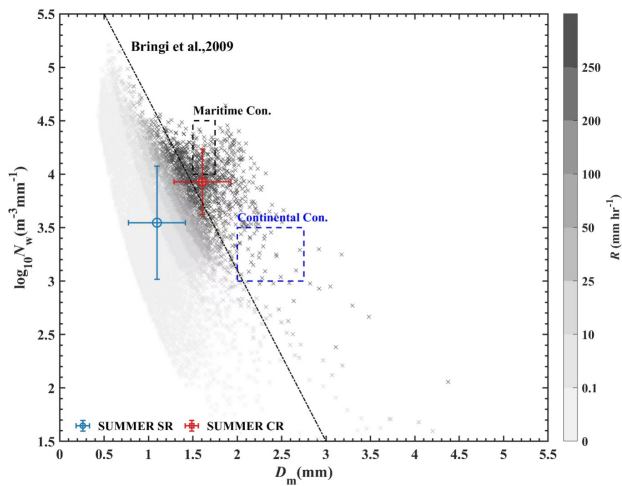
（一）雨滴谱参数分布

图3.1是log₁₀N_w和D_m的关系图，我们可以看到对流云和层状云降水很好地分布在Bringi et al^[1]中的层状云分界线两侧，对流云降水和层状云降水的分布结果与分界线的匹配度更好，在符合Gamma分布的粒子谱中，体积中值直径和质量权衡平均直径有如下关系：

$$\frac{D_0}{D_m} = \frac{3.67 + i}{4 + i}$$

结果显示南昌对流D_m为1.80~1.87，log₁₀ N_w为3.78~3.81。南昌层状D_m为1.00~1.17mm，log₁₀ N_w为3.33~3.53。

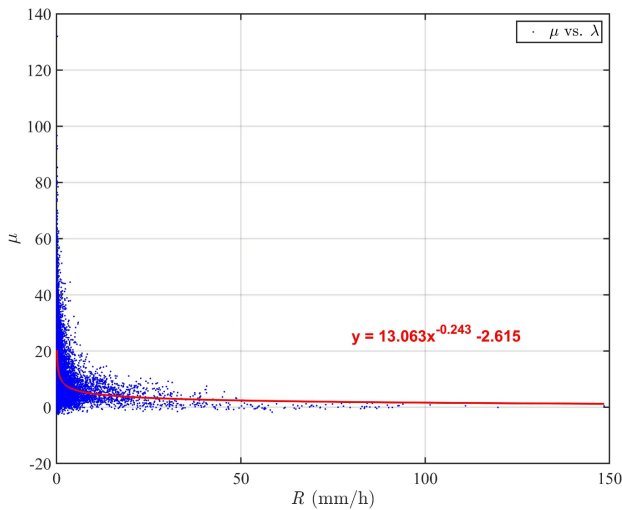
统计结果均表明南昌的对流介于大陆性对流和海洋性对流之间。层状云中D_m的标准差要远小于对流云，这表明层状云中大小粒子的分布更加集中。

图 3.1 $\log_{10}N_w$ 和 D_m 分布

(图中虚线为 Bringi et al.^[1] 获得的层状云分界线, 图中实心原点和实心方框分别代表对流云降水和层状云降水的平均 D_m 和平均 $\log_{10} N_w$, 图中的横线和竖线分别代表一个标准差 ($\pm \sigma_1$), 图中的长方形分别是海洋性对流和大陆型对流对应的区域^[1])

(二) 谱参数与雨强的关系

图 3.2~3.4 是 μ 、 Λ 和雨强的关系。在雨强较小时, μ 和 Λ 会出现较大的波动, 在南昌地区, 在雨强较小时, 层状云降水中 μ 和 Λ 的波动相对对流云更加剧烈。随着雨强增大 μ 和 Λ 值明显趋向于稳定。南昌对流云降水的 μ 和 Λ 随着雨强增加, 数值稳定在 0.68 和 1.62 mm^{-1} 附近, 层状云为 3.30~5.06 和 5.04~6.01 mm^{-1} 。

图 3.2 μ -R 和 Λ -R 分布关系

三、偏振雷达及降水估计

(一) 不同类型降水 Z-R 关系

常用的 Z-R 表达式为 $Z=AR^b$ 。通过对两边取对数, 表达式转化为一次函数:

$$\log_{10} Z = b \times \log_{10} R + \log_{10} A$$

DSD 在不同降水类型、地形、气候区甚至不同的雨滴谱仪探

测下都有很大的差异和变化, 导致 Z-R 关系系数的差异。Chen et al.^[4] 建议使用 $Z=368R^{1.21}$ 作为中国东部地区梅雨降水的 QPE 算法, Chang et al.^[15] 在反演台湾北部, 西太平洋附近台风降水时获得的 Z-R 关系式为 $Z=206.83R^{1.45}$, 与标准 Z-R 关系相比, A 更小, b 更大。

通过最小二乘法对 Z-R 关系进行拟合, 通过对南昌的拟合结果分析发现, 南昌地区层状降水和对流降水的结果非常相似, 关系式分别为 $Z=175.67R^{1.37}$ 和 $Z=131.96R^{1.51}$ (方法 1), $Z=167.49R^{1.31}$ 和 $Z=106.93R^{1.53}$ (方法 2)。南昌方法 2 中得到层状和对流的 Z-R 关系, 在雨强较小时雷达反射率因子差异较大, 随着雨强的增大偏差逐渐减小。

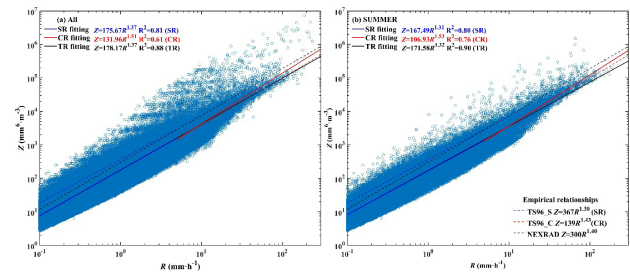


图 4.1 南昌地区 Z-R 关系拟合

南昌的 Z-R 关系与与常规雷达中的默认关系 $Z=300R^{1.4}$ 存在差异 (南昌 $Z=175.67R^{1.37}$), 但在雨强较小时三者具有较好的一致性。南昌的 Z-R 关系在雨强较大时会呈现出较大的差异。为了扩大 Z-R 关系的适用范围, 依据南昌数据获得综合关系式 $Z=302.19R^{1.40}$ 来估测降水, 此时则与常规雷达中的默认关系 $Z=300R^{1.4}$ 非常接近。

(二) 定量降水估计

利用双偏振参数进行定量降水估计常用的的算法有 $(R-K_{DP})$, $(R-K_{DP}-Z_{DR})$, 和 $(R-Z_{DR}-Z_h)$, 拟合结果参见。3 种算法整体拟合度均较高, 拟合系数在表 4.1, 4.2, 4.3 中给出

表 4.1 R- K_{DP}

降水区域类型	系数 a	系数 b
南昌对流	23.93	0.720
南昌层状	18.54	0.694

表 4.1 R- K_{DP} - Z_{DR}

降水区域类型	系数 a	系数 b	系数 c
南昌对流	0.0026	0.9227	-1.0170
南昌层状	0.0021	0.9728	-0.7806

表 4.3 R- Z_{DR} - Z_h

降水区域类型	系数 a	系数 b	系数 c
南昌对流	30.28	0.943	-0.5297
南昌层状	29.79	0.968	-0.6810

其中用 $(R-Z_{DR}-Z_h)$ 算法估计南昌对流型降水效果最差, 在不同的情况下雨强存在不同程度的低估。(R- K_{DP} - Z_{DR}) 算法拟合在不同类型降水不同地区效果均优于其他两种算法, 拟合度在 0.98 以上, 但是在对对流云降水的估测上, 在较大雨强时会出现低估的情况^[8]。

四、总结和讨论

本次研究基于2007年南昌和庐山7~8月份的 Parsivel激光雨滴谱仪的观测数据,分析了在不同类型降水之间的微物理量之间的差异和联系。通过统计分析,得出了以下的结论:

(一)两种不同的方法在对对流云的分类上呈现出很好的一致性。两种方法得到层状云和对流云的 $D_m - \log_{10} N_w$ 在分布上存在明显的区别。Thurai et al (2016) 方法对流云的 D_m 要大于 Bringi et al(2001),但是其层状云的 D_m 和 $\log_{10} N_w$ 却小于 Bringi et al(2001)分类得到的层状云。

(二)南昌的雨滴谱完全可以用 Gamma 分布来描述,谱型相近。并且层状云降水中 Gamma 分布的拟合效果要优于对流云降水。对流云和层状云在谱宽和峰值上存在明显的差异^[9]。

(三)Gamma 分布参数 $\mu - \Lambda$ 满足二次多项式关系,南昌的 $\mu - \Lambda$ 十分接近。 $\mu - \log_{10} (N_0)$ 之间存在较好的线性关系。

(四)Z-R 关系南昌地区为 $Z=175.67R^{1.37}$ 。 $K_{DP} - K_{DP} - Z_{DR}$ 之间存在很好的相关性,可以用于获取更加精确的 K_{DP} 。 $R - K_{DP} - Z_{DR}$ 定量降水估计算法在该地区具有较好的效果^[10]。

参考文献

- [1]Bringi V N,Chandrasekar V,Hubbert J,et al.Raindrop Size Distribution in Different Climatic Regimes from Disdrometer and Dual-Polarized Radar Analysis[J].Journal of the Atmospheric Sciences,2003,60(2):354-365.
- [2]Testud J,Qury S,Black R A,et al.The Concept of “Normalized” Distribution to Describe Raindrop Spectra:A Tool for Cloud Physics and Cloud Remote Sensing[J].Journal of Applied Meteorology,2001,40(10-12):1118-1140
- [3]Maki M, Keenan T D,Sasaki Y,et al.Characteristics of the Raindrop Size Distribution in Tropical Continental Squall Lines Observed in Darwin,Australia[J].Journal of Applied Meteorology,2001,40(8):1393-1412.
- [4]Chen B,Yang J,Pu J.Statistical Characteristics of Raindrop Size Distribution in the Meiyu Season Observed In Eastern China[J].Journal of the Meteorological Society of Japan,2013,91(2):215-227.
- [5]Tang Q,Xiao H,Guo C,et al.Characteristics of raindrop size distribution and their retrieved polarimetric radar parameter in northern and southern China[J]. Atmospheric Research,2014,135-136(1):59-75.
- [6]Raupach T H,Berne A.Correction of raindrop size distributions measured by Parsivel disdrometers, using a two-dimensional video disdrometer as a reference[J]. Atmospheric Measurement Techniques,2015,8(1):343-365.
- [7]Uijlenhoet R,Torres D S. Measurement and parameterization of rainfall microstructure[J]. Journal of Hydrology,2006,328(1-2):1-7.
- [8]薛力夫,郑佳锋,李锦梁,等.泉州地区南海夏季风爆发前后的雨滴谱差异研究 [J].成都信息工程大学学报,2025,40(01):64-71.DOI:10.16836/j.cnki.jcuit.2025.01.010.
- [9]柯莉萍,邹书平,吕静,等.威宁县一次冰雹天气过程的雨滴谱特征分析 [J].气象水文海洋仪器,2024,41(06):75-78.DOI:10.19441/j.cnki.issn1006-009x.2024.06.016.
- [10]李锦梁,郑佳锋,薛力夫,等.福建沿海平原和山地地区的雨滴谱差异研究 [J].气象学报,2024,82(05):694-708.