

# 宿迁夏季暴雨雨滴谱特征及其Z-R关系研究

张冬梅<sup>1</sup>, 张淑芬<sup>2</sup>, 王 纪<sup>1</sup>, 孙亚卿<sup>1</sup>, 赵梦如<sup>1</sup>

<sup>1</sup>泗洪县气象局, 江苏 宿迁

<sup>2</sup>福建省气象信息中心, 福建 福州

收稿日期: 2025年11月25日; 录用日期: 2025年12月24日; 发布日期: 2025年12月30日

## 摘要

以2022~2024年宿迁夏季雨滴谱观测数据为基础, 结合降水量、雷达及云观测, 筛选出9次暴雨样本(2次层状云、3次积雨云、4次层积混合云), 通过质量控制、Gamma函数拟合等处理方法, 分析雨滴谱特征及其Z-R关系。结果表明: 不同云型暴雨雨滴落速拟合效果良好, 速度经验公式会低估降水强度; 微物理参数(数浓度、雨强等)呈“积雨云 > 层积混合云 > 层状云”规律, 小雨滴主导数浓度、中雨滴主导雨强, 积雨云反射率因子以大雨滴贡献最大; Gamma函数拟合对小雨滴拟合好, 对大雨滴偏差随直径增大而增加; Z-R关系系数小于标准式, 平均Z-R关系为 $Z = 196.3R^{1.39}$ , 可修正标准式高估问题。

## 关键词

宿迁夏季暴雨, 雨滴谱, Gamma函数分布, Z-R关系, 微物理特征

# Study on the Characteristics of Raindrop Size Distribution and Z-R Relationship for Summer Heavy Rainfall Events in Suqian

Dongmei Zhang<sup>1</sup>, Shufen Zhang<sup>2</sup>, Ji Wang<sup>1</sup>, Yaqing Sun<sup>1</sup>, Mengru Zhao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sihong County Meteorological Bureau, Suqian Jiangsu

<sup>2</sup>Fujian Meteorological Information Center, Fuzhou Fujian

Received: November 25, 2025; accepted: December 24, 2025; published: December 30, 2025

## Abstract

Based on the summer raindrop size distribution (DSD) observation data of Suqian from 2022 to 2024, combined with precipitation amount, radar, and cloud observation data, 9 rainstorm samples were selected (2 stratiform cloud cases, 3 cumulonimbus cloud cases, and 4 stratocumulus mixed

文章引用: 张冬梅, 张淑芬, 王纪, 孙亚卿, 赵梦如. 宿迁夏季暴雨雨滴谱特征及其Z-R关系研究[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(1): 33-46. DOI: 10.12677/ccrl.2026.151006

cloud cases). Through quality control, Gamma function fitting, and other processing methods, the characteristics of raindrop size distribution and its Z-R relationship were analyzed. The results show that: The fitting effect of raindrop fall velocity is good for rainstorms of different cloud types, but the empirical velocity formula tends to underestimate the precipitation intensity. The microphysical parameters (such as number concentration and rain intensity) follow the rule of “cumulonimbus cloud > stratocumulus mixed cloud > stratiform cloud”. Small raindrops dominate the number concentration, while medium raindrops dominate the rain intensity; for cumulonimbus clouds, large raindrops contribute the most to the reflectivity factor. The Gamma function fitting performs well for small raindrops, but the deviation for large raindrops increases with the increase of raindrop diameter. The coefficient of the Z-R relationship is smaller than that of the standard formula, and the average Z-R relationship is  $Z = 196.3R^{1.39}$ , which can correct the overestimation problem of the standard formula.

## Keywords

**Summer Rainstorm in Suqian, Raindrop Size Distribution, Gamma Function Distribution, Z-R Relationship, Microphysical Characteristics**

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

暴雨是宿迁夏季主要灾害性天气，其引发的内涝、洪涝灾害对区域社会经济与民生安全威胁显著[1]。宿迁地处江淮北部气候过渡带，夏季暴雨受东亚夏季风、副热带高压及中纬度低值系统共同影响，降水系统复杂且微物理过程具独特性[2]，但当前研究多聚焦宏观环流，对雨滴谱(DSD)特征及分云型(层状云、积雨云、层积混合云)Z-R关系分析较少，制约暴雨微物理认知与雷达定量降水估测(QPE)精度提升[3]。

雨滴谱直接反映降水微物理机制，地域与云型差异性显著。郑州“7·20”极端暴雨中，积雨云降水最强时段粒子数浓度与质量加权平均直径( $D_m$ )极高， $D_m$ 达2.82 mm，直接致极端雨强[1]；淮北地区观测显示，层状云降水以直径<2 mm的雨滴为主，积雨云中雨滴对雨强贡献超75%[4]；南京地区证实，层状云雨滴谱参量稳定、谱宽最窄，积雨云谱宽最宽，三类云Gamma分布参数差异显著[5]；安宁河谷对流云粒子数浓度是层状云3.7倍，90%降水强度来自直径>1 mm粒子[6]；广东东莞不同云型降水参数遵循“积状云>混合云>层状云”规律，层状云以单峰谱为主[7]；海南屯昌三类云降水均以小雨滴为主，对流云中大雨滴对雨强贡献显著[8]，这些成果凸显宿迁分云型研究必要性。

Z-R关系( $Z = aR^b$ )的云型依赖性亦被多地证实。淮北地区层状云与积雨云Z-R关系系数分异明显，层状云呈“小a大b”特征[4]；南京地区积雨云Z-R关系系数a值最大[5]；庐山观测发现，对流云a值大、b值小[9]；张欢等研究表明，对流云降水Z-R拟合效果优于层状云[10]；短时强降水与持续性强降水的积雨云Z-R关系对比显示，大雨强下积雨云Z-R关系b值更接近经典大陆性对流云[11]。此外，雨滴下落速度具地域差异，郑州“7·20”暴雨中Atlas经验公式低估大雨滴落速[1]；贵州乌蒙山区随雨强增大，2~3 mm雨滴贡献升至70%以上[12]；青藏高原东北部雨滴落速标准曲线拟合存在低估[13]，而宿迁不同云型雨滴落速规律尚不明确。

Gamma函数拟合雨滴谱的参数差异显著，南京地区三类云Gamma参数不同[5]；淮北地区虽以层状云降水为主，但对流云对总降水贡献达75%[4]；柳州“龙舟水”降水Gamma函数对小雨滴拟合优于大

雨滴[14]; 昭苏夏季降水 Gamma 拟合也具云型差异[15], 曾庆伟等研究为雨滴谱参数化提供方法支撑[16]。

鉴于此, 本研究利用 2022~2024 年宿迁夏季 DSG1 雨滴谱仪观测数据, 结合多源资料筛选 9 次暴雨样本, 分析不同云型雨滴谱特征、Gamma 函数分布和 Z-R 关系, 旨在揭示宿迁暴雨微物理差异, 为雷达分析提供支撑, 补充沿淮过渡带数据[17]-[19]。

## 2. 资料和方法

### 2.1. 资料总述

观测使用 DSG1 降水现象观测仪, 仪器采样面积  $0.0054 \text{ m}^2$ , 粒径测量范围  $0\sim25 \text{ mm}$ , 粒子落速测量范围  $0\sim22.4 \text{ m/s}$ , 粒子测量等级分为 32 种直径和 32 种速度共计 1024 种, 取样间隔为 60 s。

本文选用 2022~2024 年宿迁夏季(6~8 月)雨滴谱资料, 结合降水量、雷达和云观测, 将 24 小时降水量  $50 \text{ mm}$  以上且小时雨强不低于  $0.1 \text{ mm/h}$  视为一次暴雨样本, 按照云状分为积雨云、层状云和层积混合云暴雨。根据筛选, 得到 9 次暴雨过程, 其中 2 次层状云暴雨(S), 4 次积层混合云暴雨(T)以及 3 次积雨云暴雨(C)。

### 2.2. 处理方法

将仪器每分钟输出的雨滴总数不小于 10 视为一个降水分钟, 剔除直径  $D \leq 0.15 \text{ mm}$  和  $D \geq 7 \text{ mm}$  的粒子。剔除粒子下落速度与 Atlas 速度经验公式

$$V(D) = 9.65 - 10.3e^{-0.6D} \quad (1)$$

计算的速度相差大于  $5 \text{ m/s}$  的数据。

利用 Battaglia 等的轴比订正法进行轴比订正。

$$AR = \begin{cases} 1 & D \leq 1 \text{ mm} \\ 1 - 0.6(D-1) & 1 \text{ mm} < D \leq 5 \text{ mm} \\ 0.7D & D > 5 \text{ mm} \end{cases} \quad D_{eq} = D \cdot AR^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

其中,  $AR$  是轴比,  $D_{eq}$  是等效粒子直径。

首先计算出单位体积、单位尺度间隔内的雨滴数浓度,

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{32} \frac{n_{ij}}{A \cdot \Delta t \cdot V_j \cdot \Delta D_i} \quad (3)$$

其中,  $D_i$  是第  $i$  个尺度通道的雨滴直径,  $n_{ij}$  是第  $i$  个尺度通道、第  $j$  个速度通道下的雨滴个数,  $A$  (单位:  $\text{m}^2$ )是雨滴谱仪的采样面积,  $\Delta t$  是采样间隔  $60 \text{ s}$ ,  $V_j$  是第  $j$  个速度通道的下落速度,  $\Delta D_i$  是第  $i$  个尺度通道的尺度间隔。 $N(D_i)$  (单位:  $\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ )表示直径介于  $D_i$  与  $D_i + \Delta D_i$  的单位体积单位尺度间隔内的雨滴数。结合表 1 中的计算公式, 由此可以计算出数浓度( $N_T$ ), 雨强( $R$ )、雨水含量( $W$ )和反射率因子( $Z$ ); 同时计算出粒子微物理结构的不同特征尺度参数: 算术平均直径( $D_a$ )、质量平均直径( $D_m$ )、体积中值直径( $D_0$ )、峰值直径( $D_p$ )、粒子谱宽( $D_w$ )。其中  $V(D)$  是 Atlas 速度经验公式(详见式(1)),  $\rho_w$  为水的密度, 取  $1 \text{ g/cm}^3$ 。

选用 Gamma 函数分布

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\lambda D} \quad (4)$$

对数浓度( $N_T$ )和直径( $D$ )的谱分布进行拟合, 式中,  $N_0$  (单位:  $\text{mm}^{-1-\mu} \cdot \text{m}^3$ )是截距参数,  $\lambda$  (单位:  $\text{mm}^{-1}$ )是斜率参数,  $\mu$  是形状因子。利用阶矩法估计谱分布的参数。

**Table 1.** Meanings and calculation formulas of DSD microphysical parameters  
**表 1.** 雨滴谱微物理特征量的含义和计算公式

特征量	符号	单位	定义	公式
数浓度	$N_T$	$\text{m}^{-3}$	单位空间的雨滴总量	$\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \text{d}D$
雨强	$R$	$\text{mm/h}$	单位时间的降水量	$\frac{6\pi}{10^4} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 N(D) V(D) \text{d}D$
雨水含量	$W$	$\text{g/m}^3$	单位空间雨滴总质量	$\frac{\pi \rho_w}{6000} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 N(D) \text{d}D$
反射率因子	$Z$	$\text{mm}^6 \cdot \text{mm}^{-3}$	降水回波强度	$\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^6 N(D) \text{d}D$
算术平均直径	$D_a$	mm	全部雨滴的直径总和除以雨滴的总数	$\frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} DN(D) \text{d}D}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \text{d}D}$
质量平均直径	$D_m$	mm	单位体积内所有粒子直径加权质量相对于粒子总质量的平均直径	$\frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^4 N(D) \text{d}D}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 N(D) \text{d}D}$
体积中值直径	$D_0$	mm	含水量的一半是由半径大于此值的大雨滴所组成的	$\frac{\int_{D_{\min}}^{D_0} D^3 N(D) \text{d}D}{\int_{D_0}^{D_{\max}} D^3 N(D) \text{d}D} = 1$
峰值直径	$D_p$	mm	最大频率直径	$N(D)$ 最大值所对应的直径
粒子谱宽	$D_w$	mm	粒子最大直径和最小直径差	$D_{\max} - D_{\min}$

### 3. 结果分析

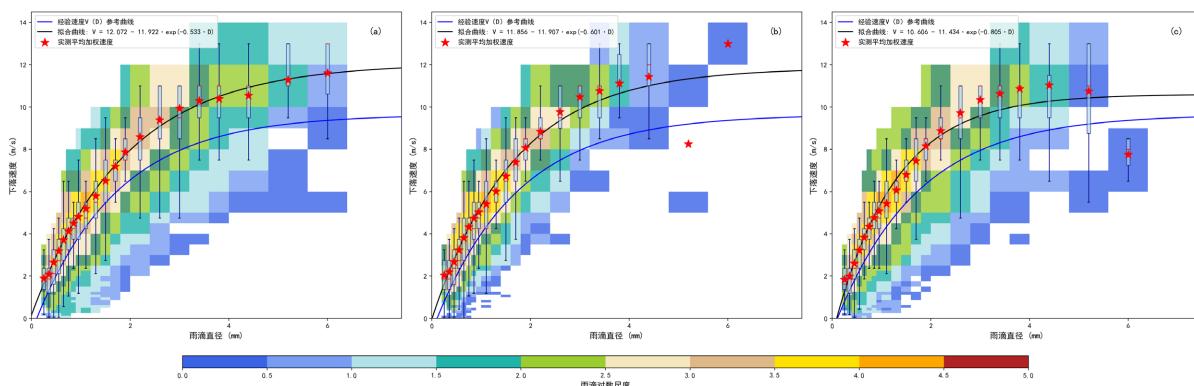
#### 3.1. 降水微物理特征分析

##### 3.1.1. 雨滴下落速度

图 1 为不同类型暴雨的雨滴谱尺度 – 速度散点分布及拟合曲线：利用速度直径公式  $V = c_1 - c_2 e^{c_3 D}$  得出的黑色拟合曲线，基本处于各尺度箱线图的四分位数之间，且与平均加权下降速度一致性较高，表明拟合效果良好；而 Atlas 经验速度公式参考曲线位于拟合曲线下方，且随粒子直径增大，两曲线间距扩大，尤其是当  $D > 1 \text{ mm}$  时，经验曲线在四分位数之外，这意味着按 Atlas 经验速度公式计算的雨强会低估宿迁降水强度，中、大雨滴数浓度贡献率越高，低估程度越大。此外，积雨云( $V = 12.072 - 11.922 e^{-0.533 D}$ )、层状云( $V = 11.856 - 11.907 e^{-0.601 D}$ )、层积混合云( $V = 10.606 - 11.437 e^{-0.805 D}$ )暴雨的雨滴尺度-速度拟合函数存在差异，想更精准的计算雨强，需考虑采用对应的尺度 – 速度函数。

##### 3.1.2. 微物理特征量的平均特征分析

雨滴谱的微物理特征量可反映降水基本特征。表 2 是不同类型暴雨雨滴谱微物理特征量的平均值：数浓度( $N_T$ )范围为  $381 \sim 613 \text{ m}^{-3}$ ，其中积雨云浓度最大，层积混合云浓度最小；平均雨强( $1.96 \sim 5.72 \text{ mm/h}$ )与含水量( $0.12 \sim 0.29 \text{ g/m}^3$ )特征一致，均为积雨云最大、层状云最小；特征直径(算数平均直径  $D_a$ 、质量平均直径  $D_m$ 、体积中值直径  $D_0$ 、峰值直径  $D_p$ )中， $D_a$ 、 $D_m$ 、 $D_0$  均为积雨云最大、层状云最小；积雨云和层积混合云的  $D_p$  相同，且均大于层状云的  $D_p$ 。



**Figure 1.** Droplet size-velocity spectrum distribution and boxplots of each size bin for different types of rainstorms ((a) Cumulonimbus cloud, (b) Stratiform cloud, (c) Stratocumulus mixed cloud) (The color scale represents the number of raindrops on a logarithmic scale, the red \* represents the measured average weighted velocity, the blue solid line represents the Atlas empirical velocity fitting curve, and the black solid line is the falling velocity fitting curve)

**图 1.** 不同类型暴雨的雨滴尺度 - 速度谱分布和各尺度档的箱线图((a) 积雨云, (b) 层状云, (c) 层积混合云)(色阶代表对数尺度的雨滴数, 红色\*代表实测平均加权速度, 蓝色实线表示 Atlas 经验速度拟合曲线, 黑色实线是下落速度的拟合曲线)

**Table 2.** Mean values of DSD microphysical parameters for rainstorms of different cloud types  
**表 2.** 不同云类型暴雨雨滴谱微物理特征量的平均值

类型	$N_T$	$R$	$W$	特征直径(mm)			
				$D_a$	$D_m$	$D_0$	$D_p$
积雨云	613.01	5.72	0.29	0.72	1.26	1.13	0.54
层状云	417.79	1.96	0.12	0.64	0.93	0.84	0.52
层积混合云	380.96	2.91	0.16	0.70	1.08	0.98	0.54

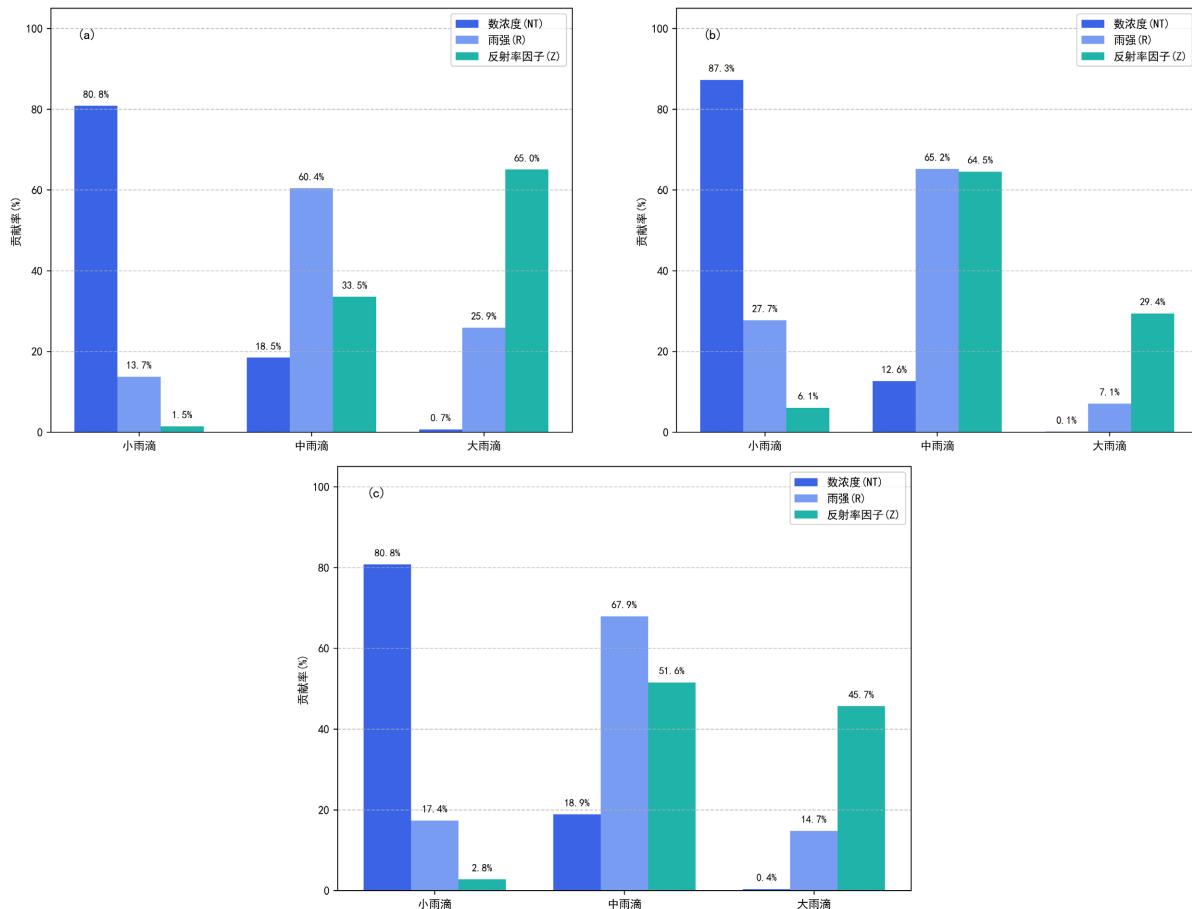
### 3.1.3. 不同尺寸雨滴对降水的贡献

为明确各尺度雨滴对降雨微物理参量的贡献, 将雨滴按直径分为 3 档: 小雨滴 ( $D \leq 1 \text{ mm}$ )、中雨滴 ( $1 \text{ mm} < D \leq 2.5 \text{ mm}$ )、大雨滴 ( $D > 2.5 \text{ mm}$ ), 分别计算其对总数浓度 ( $N_T$ )、总雨强 ( $R$ ) 和总回波强度 ( $Z$ ) 的贡献率和不同降水档下各尺度粒子对雨强 ( $R$ ) 的贡献率。

图 2 为积雨云、层状云、层积混合云暴雨中不同档位雨滴对  $N_T$ 、 $R$ 、 $Z$  的贡献率: 宿迁夏季暴雨中, 小雨滴数浓度占比最高, 层状云达 87.3%, 积雨云和层积混合云均为 80.8%; 随粒子尺度增大, 积雨云和层积混合云的中、大雨滴数浓度占比高于层状云。尽管小雨滴数占比约 80%, 但对雨强的主要贡献来自中雨滴, 不同类型暴雨中雨滴贡献率为 60.4%~67.9%。雷达反射率因子 ( $Z$ ) 的贡献中, 积雨云以大雨滴为主 (65%), 层状云和层积混合云以中雨滴为主 (分别为 64.5%、51.6%); 值得注意的是, 层积混合云中大雨滴对  $Z$  的贡献率达 45.7%。因  $Z$  与直径 ( $D$ ) 的 6 次方及数浓度成正比, 故即使大雨滴数占比不足 1%, 对  $Z$  的贡献仍远大于小雨滴。综上, 宿迁暴雨以小雨滴为主, 中雨滴是雨强的主要贡献者, 中、大雨滴则主要影响雷达反射率因子。

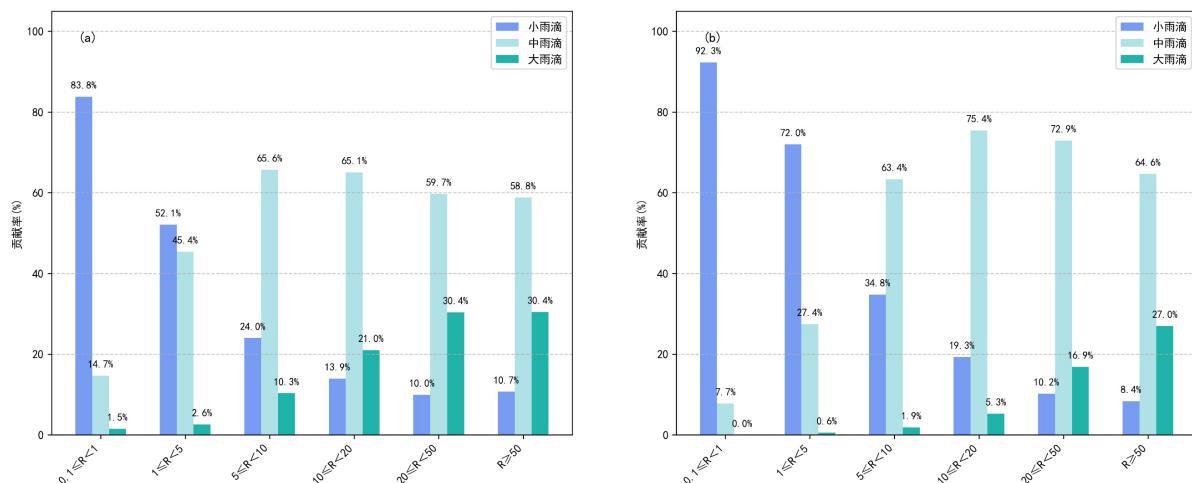
图 3 为不同云类型暴雨各档位雨滴对不同强度雨强的贡献率: 不同暴雨类型中小雨滴对雨强的贡献率随降水强度的增大呈现减小的趋势, 大雨滴的贡献率呈增大趋势; 当雨强小于 1  $\text{mm}/\text{h}$  时, 对降水率起最大贡献的为小雨滴, 层状云中最大为 92.3%; 在雨强大于 5  $\text{mm}/\text{h}$  的降水中, 中雨滴对降水率贡献始终最大, 其中当雨强为 10~20  $\text{mm}/\text{h}$  时贡献率达到最大。当雨强大于 20  $\text{mm}/\text{h}$ , 对降水率的贡献依次是中雨滴、大雨滴、小雨滴, 大雨滴贡献率在 30% 左右; 层状云和层积混合云中大雨滴在雨强大于 1  $\text{mm}/\text{h}$  时才开始对降水有贡献; 积雨云中, 当雨强大于 10  $\text{mm}/\text{h}$  时, 大雨滴对降水的贡献就超过小雨滴; 而层状云

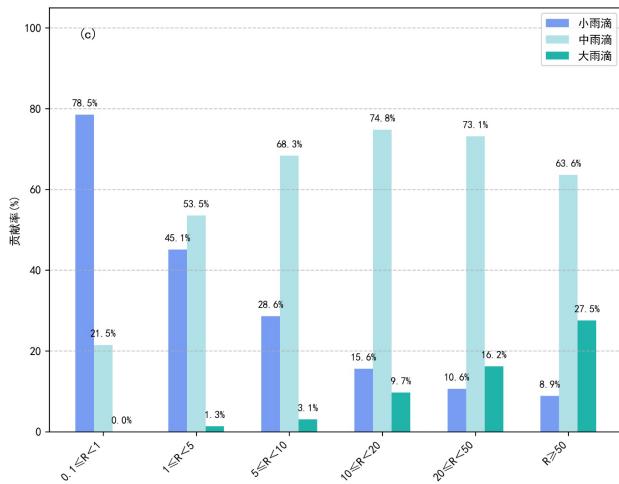
和层积混合云雨强大于 20 mm/h 时，大雨滴对降水的贡献就超过小雨滴。整体来看，中雨滴在不同雨强下对降水量的贡献起主要作用，大雨滴对雨强的贡献率逐渐增大，小雨滴的贡献率逐渐减小，当雨强大于 20mm/h 时，对降水起主要作用的为中、大雨滴。



**Figure 2.** Contribution rates of logarithmic concentration, rain intensity, and reflectivity factor of raindrops in different size bins ((a) Cumulonimbus cloud, (b) Stratiform cloud, (c) Stratocumulus mixed cloud)

**图 2.** 不同档位雨滴对数浓度、雨强、反射率因子的贡献率((a) 积雨云, (b) 层状云, (c) 层积混合云)





**Figure 3.** Contribution rates of raindrops in different size bins to precipitation intensities of various magnitudes ((a) Cumulonimbus cloud, (b) Stratiform cloud, (c) Stratocumulus mixed cloud)

**图 3.** 不同档位雨滴对不同强度雨强的贡献率((a) 积雨云, (b) 层状云, (c) 层积混合云)

### 3.2. 典型个例微物理量的演变特征

选取三个典型个例分析三类暴雨微物理量(粒子数浓度  $N_T$ 、反射率因子  $Z$ 、降雨强度  $R$ 、含水量  $W$ 、质量加权平均直径  $D_m$ 、粒子谱宽  $D_w$ )随时间(世界时)的演变。

图 4(a)为 2022 年 6 月 26 日 04 时至 11 时积雨云暴雨：各微物理参量随时间起伏剧烈，峰谷差显著。数浓度、雨强和含水量在两个数量级内波动， $D_m$  在 0~4 mm 间变化，粒子谱宽 0~6 mm，各参量趋势一致，且起伏次数多。

图 4(b)为 2022 年 6 月 23 日 04 时至 10 时层状云暴雨：各参量变化趋势一致，但起伏幅度小。粒子数密度在一个数量级内波动， $Z$ 、 $R$ 、 $W$  数值较小， $D_m$  变化范围 0~2 mm，粒子谱宽 0~4 mm，参量间相关性良好。

图 4(c)为 2024 年 7 月 8 日 13 时至 9 日 02 时层积混合云暴雨：各参量起伏程度介于前两者之间。2024 年 7 月 8 日 16:30 前为层状云降雨，参量波动小(粒子数浓度  $10^2\sim 10^3 \text{ m}^{-3}$ )，质量加权平均直径  $D_m$  和谱宽  $D_w$  符合层状云特征；16:30~17:00 转为积雨云降雨，参量骤升后于 17:30 骤降，谱宽接近 6 mm (符合积雨云特征)；17:00 后重回层状云；7 月 9 日 01:00~02:00 再次出现积雨云，变化特征相似。从  $D_m$  曲线看，积雨云时段  $D_m$  比层状云时段高 1~2 mm，可初步以  $D_m > 2 \text{ mm}$  作为积雨云降雨的判断依据。

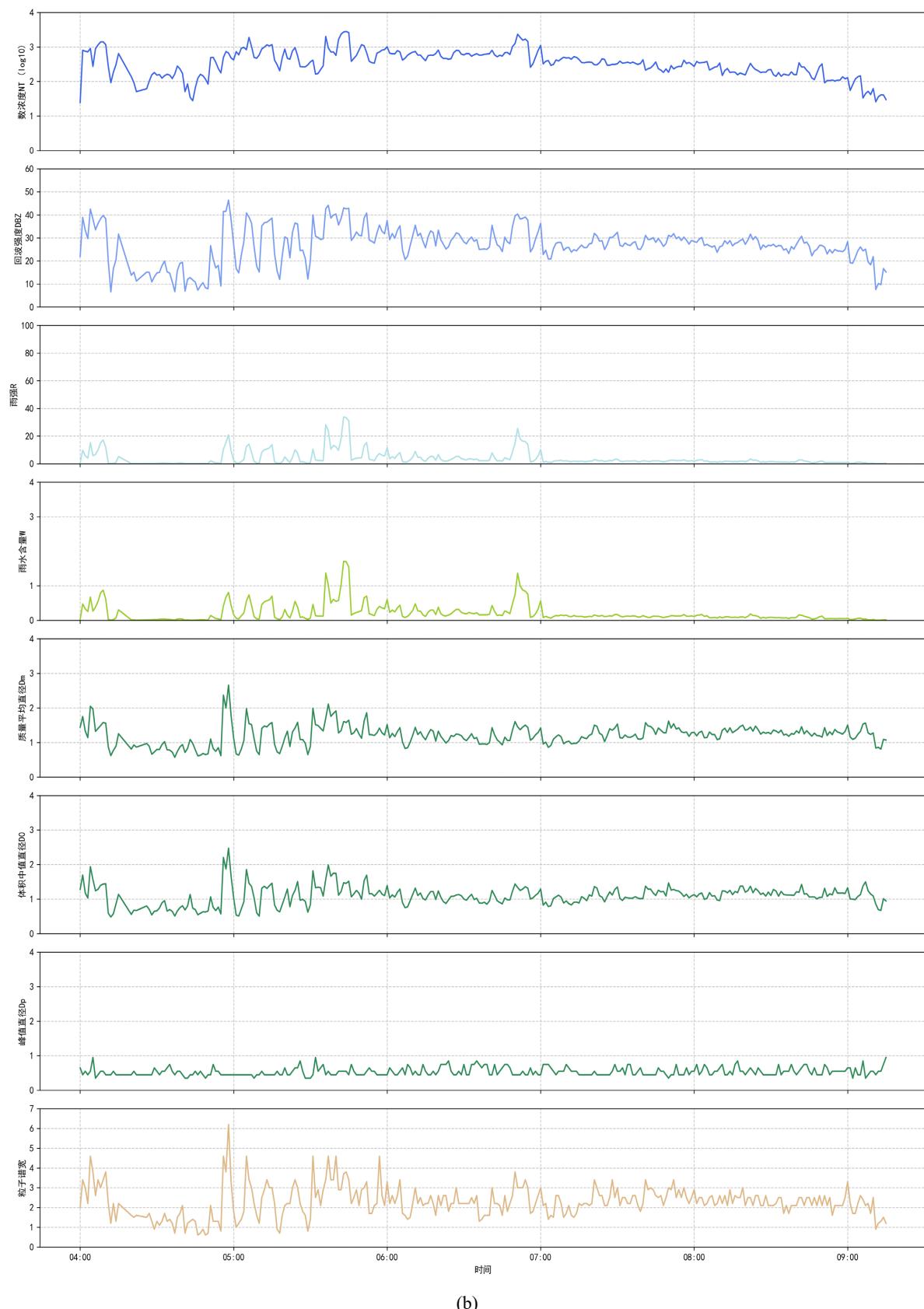
### 3.3. 雨滴谱特征

#### 3.3.1. 粒子谱 Gamma 函数拟合

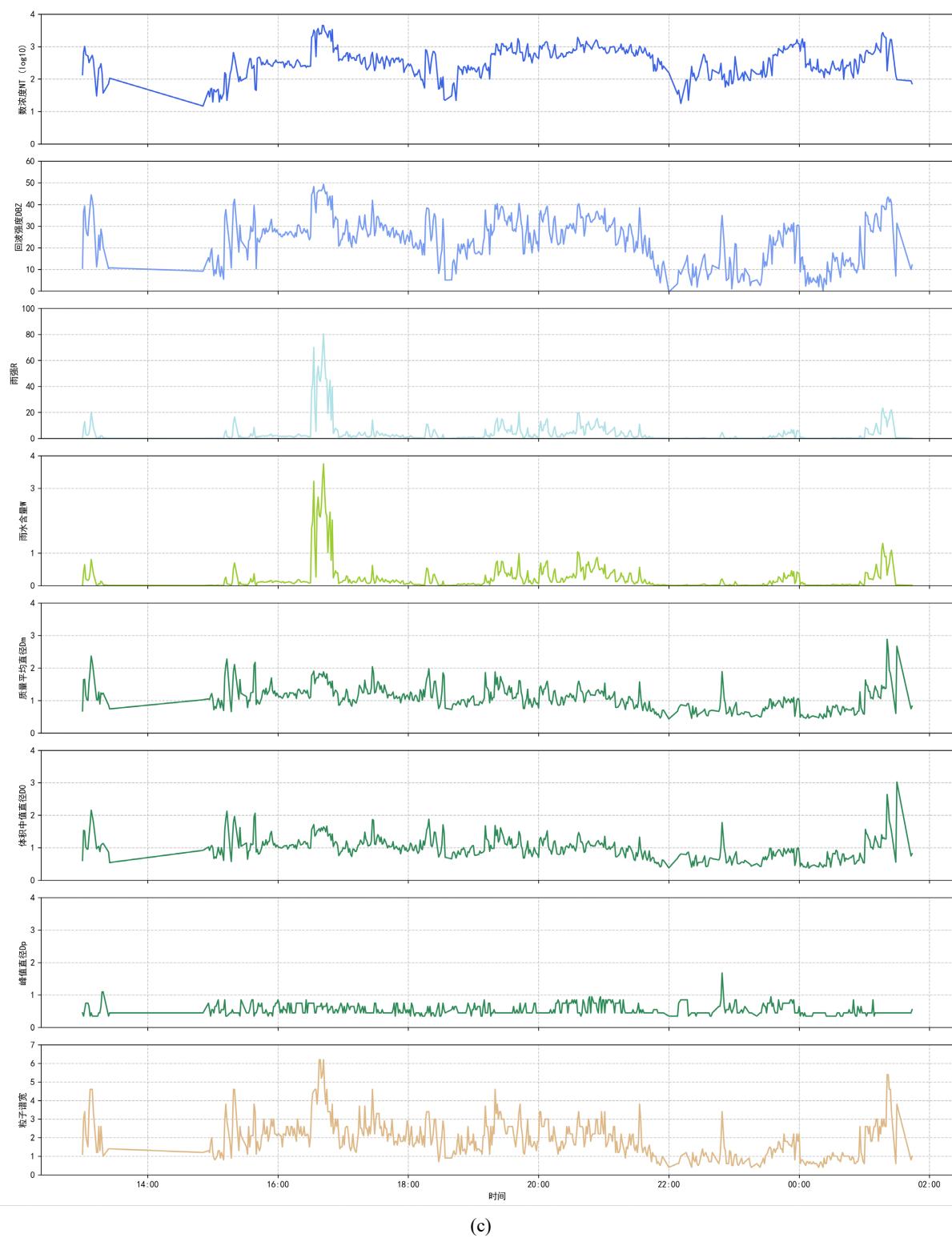
图 5 是不同云类型粒子谱 Gamma 函数拟合图：由图 a 到 c 可以看出，Gamma 函数拟合的小雨滴的拟合情况较好，峰值直径  $D_p$  均集中在 0.45~0.65 mm，但对于粒子数浓度峰值的拟合偏小，大雨滴的拟合值总体偏小，且随着雨滴直径的增加，拟合偏差越来越大。由图 d 可知，不同类型暴雨拟合曲线，积雨云暴雨的粒子谱宽最大，其次是层积混合云，层积云最小，三种暴雨的数浓度峰值和对应的峰值直径较为接近，且均为小雨滴，与前文分析对暴雨数浓度贡献率最大的为小雨滴的结论一致。此外，平均粒子谱 Gamma 函数拟合与层积混合云的 Gamma 函数拟合最为接近，介于层状云和层积混合云之间。在实际的天气过程中，多为以层状云或积雨云为主导的层积混合云降水，因此平均 Gamma 参数拟合可以作为分析暴雨过程提供，再判断暴雨主导云类型，适当向主导云类型倾斜，可以更加精确地分析尺度 - 数浓度关系。



(a)

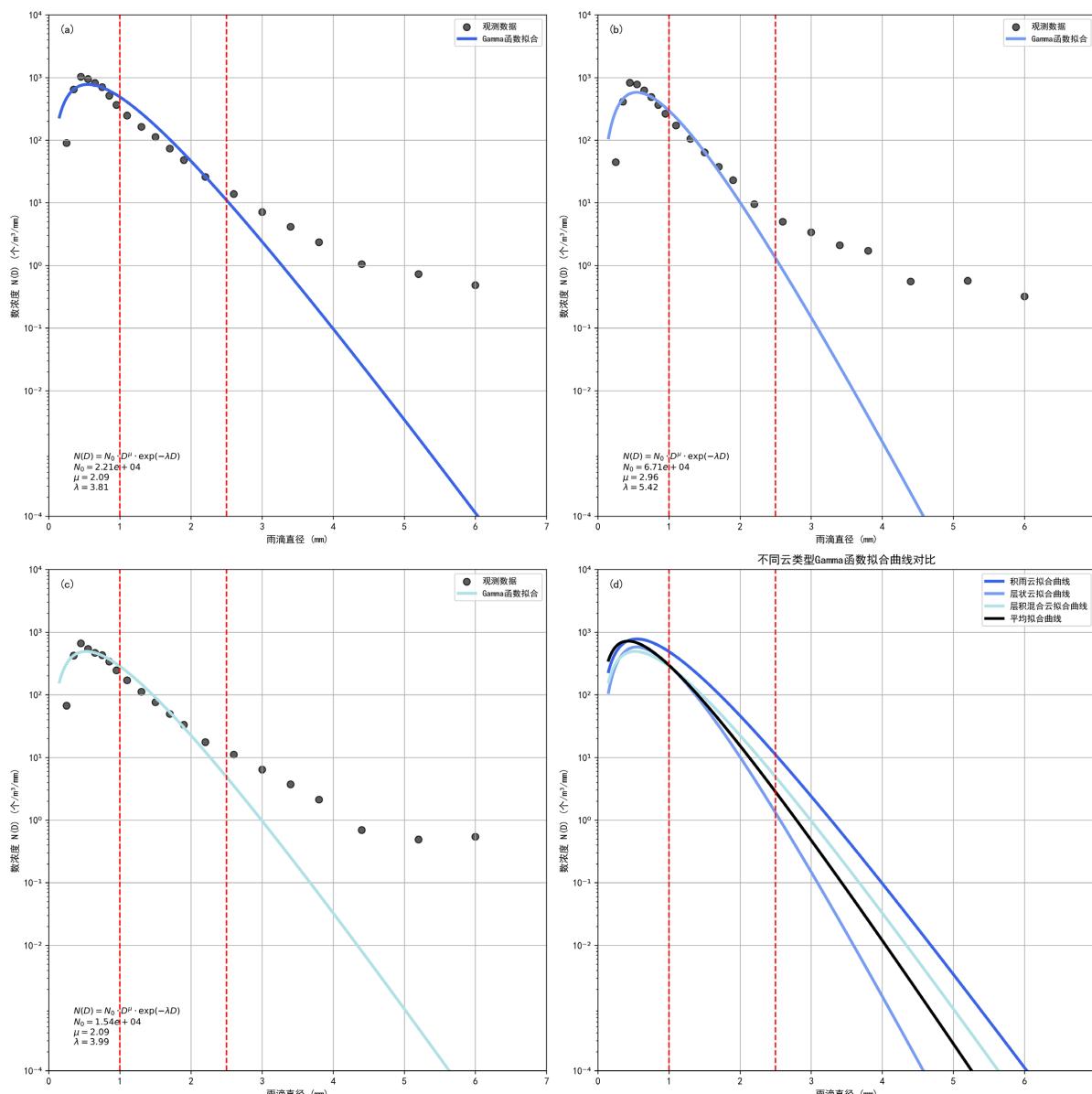


(b)



**Figure 4.** (a) Temporal variation curves of microphysical parameters for cumulonimbus rainstorms; (b) Temporal variation curves of microphysical parameters for stratiform cloud rainstorms; (c) Temporal variation curves of microphysical parameters for stratocumulus mixed cloud rainstorms

**图 4.** (a) 积雨云暴雨微物理参量随时间变化曲线; (b) 层状云暴雨微物理参量随时间变化曲线; (c) 层积混合云暴雨微物理参量随时间变化曲线



**Figure 5.** Scatter plots and corresponding gamma function fitting curves of different types of rainstorms ((a) Cumulonimbus cloud, (b) Stratiform cloud, (c) Stratocumulus mixed cloud) and comparison diagram of gamma function fitting curves among different types ((d) Gamma function fitting curves of rainstorms for different cloud types)

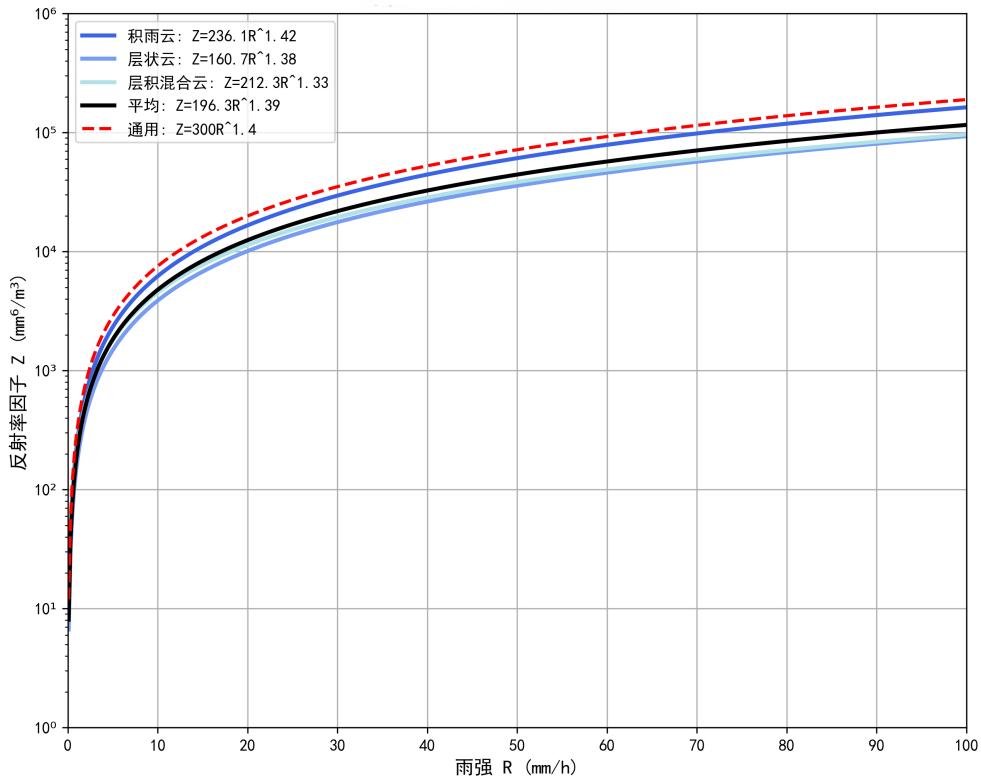
**图 5.** 不同类型暴雨散点图及其 Gamma 函数拟合曲线((a) 积雨云, (b) 层状云, (c) 层积混合云)与不同类型 Gamma 函数拟合曲线对比图((d) 不同云类型暴雨 Gamma 函数拟合曲线)

### 3.3.2. Z-R 关系

Z-R 关系是雷达定量估测降水的基础，目前雷达定量估测降水是通过  $Z = 300R^{1.40}$  来完成的。因雨滴谱分布差异引起的 Z-R 关系也随不同地区而变化， $Z = aR^b$  的系数( $a$ )和指数( $b$ )与雨滴谱分布密切相关，按云类型分布拟合关系，能更好提高降水估测精度。

图 6 对不同云类型暴雨使用最小二乘法对 Z-R 关系拟合的曲线；可以看出，积雨云( $Z = 236.1R^{1.42}$ )、层状云( $Z = 160.7R^{1.38}$ )、层积混合云中( $Z = 212.3R^{1.33}$ )暴雨 Z-R 关系与标准关系  $Z = 300R^{1.40}$  均存在差异，整体系数与标准关系式相比偏小，系数  $a$  变化范围为 160.7~236.1；指数较为相似，指数  $b$  变化范围为

1.33~1.42。对宿迁暴雨总样本质量控制后拟合得的平均  $Z$ - $R$  关系为  $Z = 196.3R^{1.39}$ ，不同云类型暴雨和平均  $Z$ - $R$  拟合曲线均在  $Z = 300R^{1.40}$  下方，目前雷达估测降水所采用的标准关系式会高估淮北地区夏季暴雨降水，尤其对层状云和层积混合云暴雨误差相对较大。



**Figure 6.** Comparison diagram of fitting functions for  $Z$ - $R$  relationships of rainstorms of different cloud types and the average  $Z$ - $R$  relationship

**图 6.** 不同云类型暴雨和平均  $Z$ - $R$  关系拟合函数对比图

#### 4. 结论

利用 2022~024 年宿迁夏季(6~8 月)暴雨进行分类和统计处理，得到了积雨云、层状云、层级混合云等 3 类不同类型暴雨的微物理参数、Gamma 函数分布以及  $Z$ - $R$  关系等，并进行了相应的分析，结果如下：

1. 雨滴下落速度与经验公式差异显著：宿迁不同云型暴雨雨滴落速拟合曲线( $V = c_1 - c_2 e^{c_3 D}$ )拟合效果良好，而 Atlas 经验公式曲线位于拟合曲线下方，且随雨滴直径增大(尤其  $D > 1 \text{ mm}$ )间距扩大，按该经验公式计算会低估降水强度，且中、大雨滴浓度贡献率越高，低估程度越大，不同云型暴雨需用对应落速函数计算雨强。
2. 微物理参数具云型差异性：数浓度( $N_T$ )、平均雨强( $R$ )、含水量( $W$ )及多数特征直径( $D_a$ 、 $D_m$ 、 $D_0$ )均呈“积雨云  $>$  层积混合云  $>$  层状云”规律，仅峰值直径( $D_p$ )为积雨云与层积混合云相同且大于层状云，数浓度( $N_T$ )范围  $381\sim613 \text{ m}^{-3}$ ，平均雨强( $R$ )范围  $1.96\sim5.72 \text{ mm/h}$ ，雨水含量( $W$ )范围  $0.12\sim0.29 \text{ g/m}^3$ 。
3. 不同尺寸雨滴贡献各有侧重：数浓度上，小雨滴( $D \leq 1 \text{ mm}$ )占比最高(层状云 87.3%，积雨云、层积混合云均 80.8%)；雨强上，中雨滴( $1 \text{ mm} < D \leq 2.5 \text{ mm}$ )是主要贡献者(贡献率 60.4%~67.9%)；雷达反射率因子( $Z$ )上，积雨云以大雨滴( $D > 2.5 \text{ mm}$ )为主(65%)，层状云、层积混合云以中雨滴为主(分别 64.5%、

51.6%)，且大雨滴因  $Z$  与  $D^6$  成正比，虽数量占比低但对  $Z$  贡献大。

4. 微物理参数起伏相似且可用  $D_m$  初判云型：暴雨类型决定了其微物理参数的时间演变特征，积雨云暴雨参数起伏最剧烈、峰谷差最显著且波动次数多，层状云暴雨参数起伏幅度最小且参数间相关性良好，层积混合云暴雨参数起伏程度介于两者之间，且会随云型(层状云与积雨云)转换呈现“低波动-骤升骤降-低波动”的阶段性变化，同时质量加权平均直径  $D_m$  可作为初步判断云型的依据。

5. 雨滴谱 Gamma 函数拟合存在特点：Gamma 函数对小雨滴拟合较好，峰值直径  $D_p$  集中在 0.45~0.65 mm，但对粒子数浓度峰值及大雨滴拟合值偏小，且雨滴直径越大拟合偏差越大；谱宽呈“积雨云 > 层积混合云 > 层状云”，三者数浓度峰值及对应  $D_p$  接近且均为小雨滴；平均 Gamma 参数拟合与层积混合云最接近，可作为暴雨分析参考，实际需结合主导云类型调整。

6.  $Z-R$  关系与标准式差异明显且具云型依赖性：宿迁暴雨  $Z-R$  关系整体系数  $a$  在 160.7 到 236.1 之间，小于标准式  $Z = 300R^{1.40}$ ，指数  $b$  在 1.33 到 1.42 之间与标准式相近；总样本拟合关系为  $Z = 196.3R^{1.39}$ ，标准式会高估宿迁暴雨降水，尤其层状云和层积混合云误差较大，分云型拟合  $Z-R$  关系可提高降水估测精度。

本论文建立的宿迁分云型  $Z-R$  关系能优化传统标准式，更精准反演不同云型暴雨雨强，提升本地雷达定量降水估测精度，同时明确的不同云型暴雨微物理特征可助力通过雷达回波快速判断暴雨云型、预判雨强变化，为暴雨灾害预警与防控提供支撑，一定程度上补充江淮北部气候过渡带宿迁的暴雨微物理基础数据；但本论文也存在一定局限性，在仅依托 2022~2024 年夏季 9 次暴雨样本，样本量少、时间跨度短，代表性受限，无法充分反映宿迁夏季暴雨微物理特征的年际变化规律，可能导致研究得出的雨滴谱特征结论与分云型  $Z-R$  关系的普适性受限，无法完全代表宿迁长期夏季暴雨的真实微物理状况。

## 参考文献

- [1] 张哲, 戚友存, 李东欢, 等. 2021 年郑州“7·20”极端暴雨雨滴谱特征及其对雷达定量降水估测的影响[J]. 大气科学, 2022, 46(4): 1002-1016.
- [2] 张庆池, 刘端阳, 武艳, 等. 淮北地区不同类型暴雨雨滴谱特征及其  $Z-R$  关系研究[J]. 气象学报, 2022, 80(6): 967-985.
- [3] 黄兴友, 印佳楠, 马雷, 等. 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, 2019, 43(3): 691-704.
- [4] 刘晓璐, 郭善云, 郑飒飒, 等. 安宁河谷雨季层状云和对流云降水的雨滴谱特征[J]. 高原山地气象研究, 2023, 43(3): 32-39.
- [5] 高建秋, 阮征, 游积平, 等. 广东东莞不同类型云的雨滴谱和降水特征[J]. 气象科技, 2015, 43(6): 1080-1088.
- [6] 毛志远, 黄彦彬, 敖杰, 等. 海南屯昌三类云降水雨滴谱分布特征[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2023, 41(3): 268-276.
- [7] 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.
- [8] 李德俊, 杨剑超, 蔡定军, 等. 降雨型滴谱与反射率因子及雨强关系研究[J]. 气象与减灾研究, 2009, 32(4): 39-44.
- [9] 张欢, 潘江平, 苑海燕, 等. 雷达回波强度与雨滴谱参数的相关性研究[J]. 气象科学, 2017, 37(6): 797-807.
- [10] 李山山, 王晓芳, 李国平, 等. 短时强降水和持续性强降水的雨滴谱特征对比[J]. 暴雨灾害, 2023, 42(1): 1-12.
- [11] 周坤论, 黄剑钊, 王玮, 等. 柳州 2022 年“龙舟水”过程一次降水的雨滴谱特征分析[J]. 气象研究与应用, 2023, 44(1): 87-93.
- [12] 柯莉萍, 谷晓平, 张艳, 等. 贵州乌蒙山区雨滴谱特征及降水估测研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2021, 43(6): 1166-1175.
- [13] Han, H., Zhang, Y., Tian, J. and Kang, X. (2023) Raindrop Size Distribution Measurements at High Altitudes in the Northeastern Tibetan Plateau during Summer. *Advances in Atmospheric Sciences*, **40**, 1244-1256.  
<https://doi.org/10.1007/s00376-022-2186-z>

- [14] 曾庆伟, 何宏让, 张云, 等. 雨滴谱参数化及其在降水估计中的应用[J]. 气象与减灾研究, 2015, 38(4): 46-53.
- [15] 江雨霏, 杨莲梅, 曾勇, 等. 昭苏夏季层状云和对流云降水的雨滴谱特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(3): 8-16.
- [16] 陈宝君, 王元, 明杰. 台风“莫拉克”(2009)降水雨滴谱的微物理特征[J]. 热带气象学报, 2012, 18(2): 162-171.
- [17] 陈超, 张阿思, 吴乃庚, 等. 华南季风区(广东)雨滴谱统计特征[J]. 热带气象学报, 2023, 29(1): 55-67.
- [18] 张庆池, 吕翔, 刘子贺, 等. 登陆台风不同强度降水的雨滴谱特征对比[J]. 气象, 2022, 48(12): 1617-1628.
- [19] 杨涛, 杨莲梅, 刘凡, 等. 中国西天山两次短时强降水过程雨滴谱特征研究[J]. 大气科学, 2023, 47(5): 1495-1509.