

安徽淮南2016年夏季雨滴谱特征的研究

王秋淞¹ 王福增¹ 刘俊卿²

(1 成都信息工程大学电子工程学院, 成都 610225; 2 西藏自治区人工影响天气中心, 拉萨 850011)

摘要: 通过研究不同云系降水雨滴谱 (DSD) 的分布特征, 可以加深对降水微物理过程的理解, 对提高雷达定量降水估计精度有重要意义。分析2016年6—8月安徽淮南降雨过程的Parsivel降水粒子谱仪观测资料, 对粒子分布特征、降水强度与粒径的关系、粒子数密度分布与雨强贡献率分布、 $Z-I$ 关系及 $M-P$ 分布、Gamma分布拟合进行研究, 得到结论如下。1) 对流云降水中小于1 mm粒径的粒子数密度占比为73.22%, 其对雨强贡献率为34.07%; 层状云降水中小于1 mm粒径的粒子数密度占比为84.09%, 其对雨强贡献率为58.82%。2) 安徽淮南2016年夏季降水 $Z-I$ 关系可用对流云拟合曲线 $Z=53.17 \times I^{1.65}$ 估测, $Z-I$ 关系经验公式 ($Z=300 \times I^{1.40}$) 在相同雷达反射率因子下低估了降水。3) 对流云降水过程中, Gamma分布拟合比 $M-P$ 分布拟合更精确, 层状云降水过程中, 两种拟合方法差别很小。Gamma分布能更准确地表现安徽淮南粒子数密度与直径之间的关系。

关键词: 雨滴谱分布, 对流云降水, 层状云降水

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.04.017

Study on the Characteristics of Raindrop Spectrum in Huainan, Anhui in the Summer of 2016

Wang Qiusong¹, Wang Fuzeng¹, Liu Junqing²

(1 College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225
2 Weather Modification Center of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850011)

Abstract: By studying the distribution characteristics of precipitation raindrop spectra (DSD) in different cloud systems, it is possible to deepen the understanding of the microphysical process of precipitation, which is of great significance for improving the accuracy of radar quantitative precipitation estimation. This paper analyzed the observation data of the Parsivel precipitation particle spectrometer during the rainfall process in Huainan, Anhui Province from June to August 2016. The relationship between particle distribution characteristics, precipitation intensity and particle size, particle number density distribution and rain intensity contribution rate distribution, $Z-I$ relationship and the $M-P$ and Gamma distribution fitting are studied, and the conclusions are as follows: 1) The number density of particles smaller than 1mm in the convective cloud precipitation accounts for 73.22%, and its contribution to rain intensity is 34.07%. Large particles with a small number density provide most of the precipitation contribution rate; The number density of particles smaller than 1 mm in stratiform cloud precipitation accounts for 84.09 and its contribution rate to rain intensity is 58.82% 2) The $Z-I$ relationship of summer precipitation in Huainan, Anhui in 2016 can be estimated by the convective cloud fitting curve $Z = 53.17 \times I^{1.65}$. The $Z-I$ relationship empirical formula ($Z = 300 \times I^{1.40}$) underestimates precipitation under the same radar reflectivity factor. 3) In the process of convective cloud precipitation, Gamma distribution fitting is more accurate than $M-P$ distribution fitting. In the process of stratiform cloud precipitation, the two fitting methods have little difference. Gamma distribution can more accurately represent the relationship between particle number density and diameter in Huainan, Anhui.

Keywords: raindrop size distribution, convective cloud precipitation, stratiform cloud precipitation

0 引言

安徽是我国重要的商品粮生产大省^[1]。然而, 受地理位置和气候的双重影响, 安徽农业受涝影响十分严重, 由暴雨引发的洪涝灾害是安徽长期以来农业生

产过程中的首要威胁因素。淮南处于安徽中部, 属于亚热带季风气候, 夏季降水时间长, 总雨量大。因此分析安徽淮南雨滴谱, 对预防可能发生的水灾, 改善农业生产和人民生活具有重要意义。

雨滴谱研究对进一步了解自然降水的物理过程, 为数值模式提供科学依据和更好地实现雷达定量估测降水有重要意义^[2]。Tokay等^[3]使用雨滴谱仪的观测资料进行热带地区降水分析, 首次根据雨滴谱仪观测资

收稿日期: 2020年9月3日; 修回日期: 2021年4月20日
第一作者: 王秋淞 (1994—), Email: wqs6770189@163.com
通信作者: 王福增 (1966—), Email: wangfz@cuit.edu.cn
资助信息: 国家重点研发计划 (2018YFC1507201)

料对降水类型进行划分：以5 mm/h为临界值划分降水类型，在相同雨强下，层状云降水包含更多的大雨滴和较少的小雨滴。我国也进行了大量雨滴谱观测，周毓荃等^[4]比较河南干旱年不同类型的降水雨滴谱特征差异，发现层状云降水各参数相较于对流云降水起伏更小。毛志远等^[5]分析2017年海南海口秋季暴雨雨滴谱特征，结果表明当进行Gamma分布拟合时，直径在1.5~3 mm范围内的雨滴，其拟合最为理想。陈宝君等^[6]利用雨滴谱仪资料对沈阳夏季积雨云、层状云和混合云降水的雨滴谱进行了M-P分布拟合和Gamma分布拟合分析，认为M-P分布更适合层状云降水拟合，而Gamma分布拟合具有普适性。在理想情况下，雷达反射率因子与雨强满足指数关系 $Z=At^b$ ，冯雷等^[7]统计了各种天气环境下的典型系数，认为系数A随着雨滴尺度的增大而增大，随着数密度增大而减小，指数系数b则随着数密度和雨滴尺度的共同增大而增大。

本文分析了安徽淮南2016年夏季雨滴谱的粒子分布特征、降水强度与粒径的关系、粒子数密度分布与雨强贡献率分布、Z-I关系及M-P分布、Gamma分布拟合，以研究安徽淮南2016年夏季对流云和层状云降水特征。

1 仪器和数据处理

降水现象观测是地面气象观测的基本内容之一，实现降水现象自动观测，将有效提高观测的频次和质量^[8]，本文使用Parsivel降水粒子谱仪持续观测安徽淮南2016年夏季的降水数据进行分析。

1.1 仪器介绍

Parsivel降水粒子谱仪采用平行激光束为采样空间，光电管阵列为接受传感器，当有降水粒子（无论固态还是液态甚至沙尘）穿越采样空间时，自动记录遮挡物的宽度和穿越时间，从而计算降水粒子的尺度和速度^[9]。

Parsivel降水粒子谱仪能够提供10 s~1 h时间分辨率的降水粒子谱数据，一般我们选择60 s时间分辨率。Parsivel降水粒子谱仪测量的数据共有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32个通道对应的数据范围为0.062~24.5 mm；粒子速度测量通道数据范围对应着0.05~20.8 m/s。每一次采样间隔内的粒子谱测量数据都有32一次采样间隔内的个。

1.2 数据处理

降水粒子谱仪安装在淮南市气象局观测场内，记录了2016年6—8月的降水过程，仪器连续采样，时间分辨率为60 s。由于直径大于6 mm的雨滴在降水中很少见，考虑个别时刻中出现大于6 mm雨滴是由雨滴粒

子重叠所造成的误差，因此对这部分数据进行剔除。同时为保证数据质量，将一条数据中雨滴数小于10或者雨强小于0.1 mm/h的数据视为噪音^[10]。

1.2.1 粒子变形订正

由于雨滴粒子在降落过程中会产生一定的形变，为减小误差，对质量控制后的雨滴谱数据进行变形修订。根据Battaglia等^[11]的研究，定义轴比 a_r 为雨滴粒子径向和横向长度的比值。对粒径小于1 mm的降水粒子定义为球形；对粒径在1~5 mm的降水粒子定义轴比 $a_r=1.075-0.075D_{eq}$ ， D_{eq} 为等效降水粒子直径；对粒径大于5 mm的降水粒子定义轴比 $a_r=0.7$ 。

1.2.2 降水粒子理想降落末速度公式

Atlas等^[12]的研究表明，降水粒子理想降落末速度公式如下，其中x为粒子直径，v为粒子降落末速度：

$$\begin{cases} v=0, & x<0.03 \\ v=4.323 \times (x-0.03), & 0.03 \leq x \leq 0.6 \\ v=9.65-10.3 \times e^{-0.6x}, & x>0.6 \end{cases} \quad (1)$$

1.2.3 雨滴谱反演计算公式

雨滴粒子数密度N计算公式为：

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{32} \frac{n_{ij}}{A \cdot \Delta T \cdot V_j} \quad (2)$$

$$N = \sum_{i=1}^{32} N(D_i) \quad (3)$$

其中： $N(D_i)$ 为各粒径粒子数密度； D_i 为各档粒子粒径； n_{ij} 代表粒径第i档、速度第j档的雨滴数；A为降水粒子谱仪采样底面积，取值为5400 mm²； ΔT 为取样时间，本文用60 s时间分辨率； V_j 为某个速度档位的速度值，单位为m/s。

降水强度I，单位为mm/h，Pruppacher和Klett^[13]提出公式为： $I = \frac{6\pi}{10^4} \sum_{i=1}^{32} D_i^3 V(D_i) N(D_i)$ 。

雷达反射率因子Z，单位为mm⁶/m³，公式为：

$$Z = \sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^6 \quad (5)$$

平均直径为全部雨滴的直径总和除以雨滴的总数 D_l ，公式为：

$$D_l = \frac{\sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i}{\sum_{i=1}^{32} N(D_i)} \quad (6)$$

优势直径为对含水量贡献最多的直径，即为公式(7)最大值对应的直径，公式为：

$$N(D_i) D_i^3 \quad (7)$$

1.2.4 M-P分布拟合

通过观测得到的雨滴谱都是离散的，使用双参数

指数分布来模拟雨滴粒径分布，公式为：

$$N(D) = N_0 \times e^{-\lambda D}, \quad (8)$$

式中： N_0 为数密度参数，单位为 mm^6/m^3 ； λ 为尺寸参数，单位为 mm^{-1} 。

但是这种分布形态在描述小雨滴和大雨滴部分时与实际观测资料相比有一定误差。

1.2.5 Gamma 分布拟合

Ulbrich和Atlas^[14]提出了一个修正后的雨滴粒径分布形态，将雨滴谱分布视为Gamma分布，用来修正分布在小雨滴和大雨滴的分布形态。

此时雨滴粒径分布由原来的双参数指数分布变为三参数的Gamma分布，公式为：

$$N(D) = N_0 \times D^\mu \times e^{-\lambda D}, \quad (9)$$

式中： μ 是无量纲参数，称为形状因子。当 $\mu > 0$ 时，曲线向上弯曲； $\mu < 0$ 时，曲线向下弯曲； $\mu = 0$ 时，该式则变成式（8）。

Gamma分布拟合一般使用最小二乘法或阶矩法将观测的雨滴粒径分布 $N(D)$ 拟合到Gamma分布，可以求得其分布的三个参数 μ （无因次）、 λ 、 N_0 。本文采用最小二乘法对M-P分布、Gamma分布进行拟合。

1.2.6 拟合相关系数

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n (y_i - Y_i))^2}{n}}{\sum_{i=1}^n y_i^2}, \quad (10)$$

式中： y_i 为实际值， Y_i 为拟合曲线值， $\sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2$ 为残差平方和， $\sum_{i=1}^n y_i^2$ 为总平方和。 R^2 分布区间为(0, 1)， R^2 越小说明拟合得越差， R^2 越大说明拟合得越好。

2 安徽淮南2016年夏季雨滴谱特性分析

本节对安徽淮南2016年夏季降雨总体特征、对流云降水特征和层状云降水特征的粒子分布特征、降水强度与粒径的关系、粒子数密度分布与雨强贡献率分布、Z-I关系分布及M-P分布、Gamma拟合方面进行了分析。

2.1 安徽淮南夏季降水分布总体特征

此次共获得样本14489个，其中6月样本7878个，7月样本4071个，8月样本2540个，其中持续时间为0.5 h以上的降水过程分别为12次、9次、8次。由采集到的数据可以看出，安徽淮南夏季降雨较为频繁，且呈现出6月频次最高且逐步降低的规律。Tokay等^[3]指出使用平均降水强度5 mm/h为临界值划分降水类型，此次数据中包含对流云降水2次，层状云降水27次，总体上安徽淮南2016年夏季降水以层状云降水为

主。其中两次对流云降水持续时间分别为2 h 55 min、1 h 37 min，平均降水强度分别为11.23 mm/h、6.71 mm/h。层状云降水持续时间普遍偏长，其中持续时间超过3 h的层状云降水过程14次，最长达21 h 54 min，最大雨强为3.08 mm/h。

2.2 粒子分布特征

安徽淮南2016年夏季降水粒子分布如图1所示。

图1a和1b横轴为粒子直径，纵轴为粒子降落末速度，色标代表粒子数密度大小。拟合曲线是粒子直径与粒子降落末速度拟合曲线，为不受降水时长的

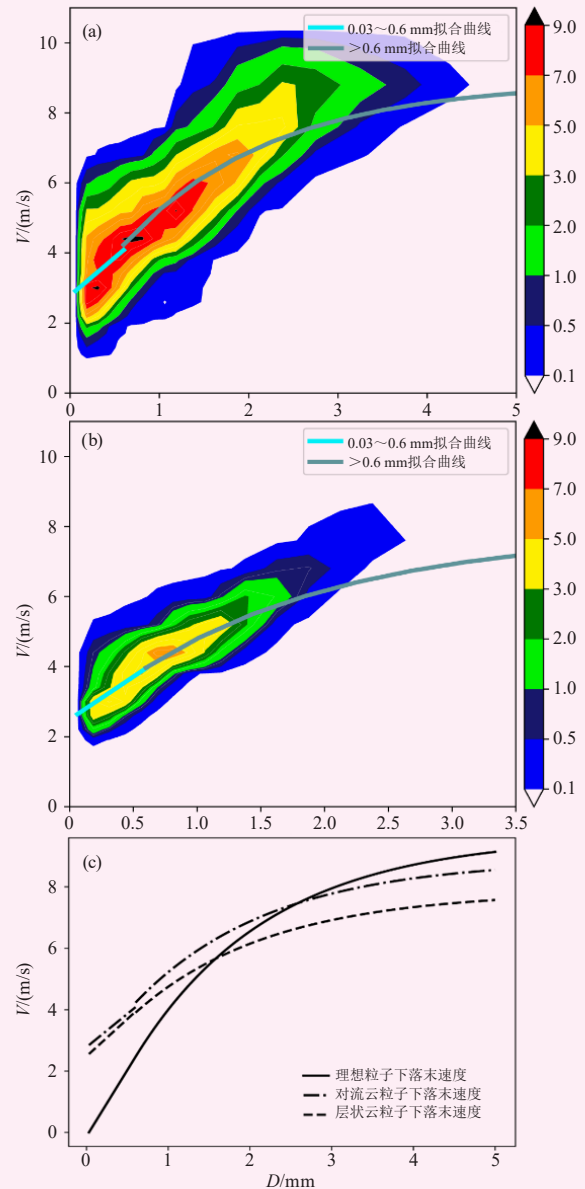


图1 安徽淮南2016年夏季降水粒子分布
(a) 对流云, (b) 层状云, (c) 对比

Fig.1 Distribution of precipitation particles in the summer of 2016 in Huainan, Anhui

(a) convective cloud, (b) stratiform cloud, (c) compare

影响, 粒子数密度取平均值。图1a中对流云粒子直径集中分布在0.187~1.625 mm, 粒子速度主要分布在2.5~6 m/s, 拟合公式为:

$$\begin{cases} v=0, & x<0.03 \\ v=2.17 \times (x+1.28), & 0.03 \leq x \leq 0.6 \\ v=8.88-6.67 \times e^{-0.6x}, & x>0.6 \end{cases} \quad (11)$$

图1b中层状云粒子直径集中分布在0.125~0.937 mm, 粒子速度主要分布在2.2~4.5 m/s, 拟合公式为:

$$\begin{cases} v=0, & x<0.03 \\ v=2.43 \times (x+1.02), & 0.03 \leq x \leq 0.6 \\ v=7.85-5.56 \times e^{-0.6x}, & x>0.6 \end{cases} \quad (12)$$

图1c为理想粒子下落末速度与两种拟合的粒径下落末速度对比图。从图1c得到结论: 在相同粒径下, 小粒径粒子下落末速度大于理想粒子下落末速度, 大粒径粒子下落末速度小于理想粒子下落末速度, 这与淮南一次飑线过程雨滴谱分析拟合结果相似^[15]。这是由于理想粒子下落末速度假设大气为静止状态,

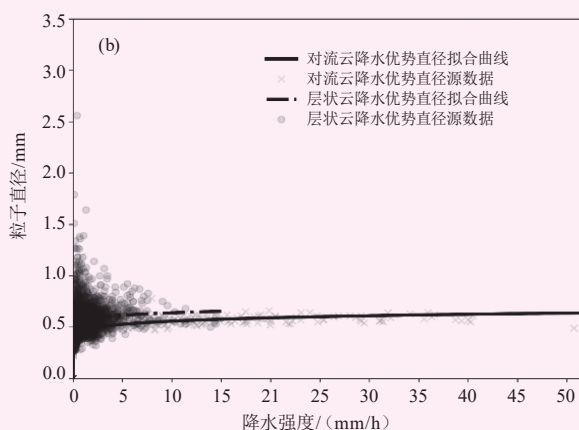
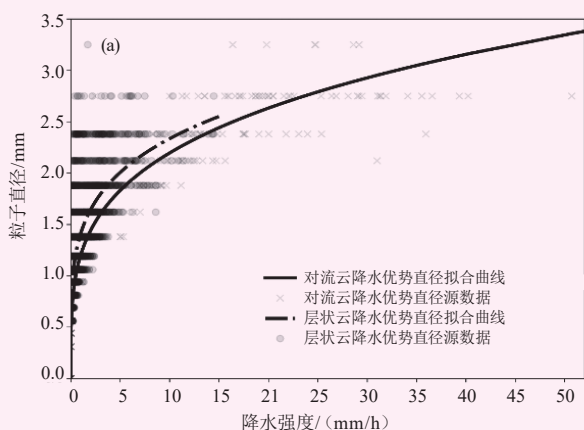


图2 安徽淮南2016年夏季降水强度与粒径关系
(a) 优势直径, (b) 平均直径

Fig.2 Relationship between summer precipitation intensity and particle size in Huainan, Anhui in 2016
(a) dominant diameter, (b) average diameter

论一致。

2.4 粒子数密度分布与雨强贡献率分布

由图3a可知, 对流云降水在1 mm以下粒子数密度占比为73.22%, 1 mm以上粒子数密度占比为26.78%; 1 mm以下粒子降水贡献率占比为34.07%, 1 mm以上粒子降水贡献率占比为65.93%。图3b显示, 层状云降水1 mm以下粒子数密度占比为84.09%, 降水贡献率占比为58.82%。1~2 mm、2~3 mm粒子数密度占比分别为14.80%、1.11%, 降水贡献率分别为35.21%、5.97%, 没有大于3 mm粒径的粒子。层状云降水过程中, 无论是粒子数密度还是降水贡献率, 都

而雨滴实际下落过程中受到横向风和纵向风的影响, 且小粒径粒子更易受风影响, 导致实际拟合过程中小粒径粒子相较于大粒径粒子与理想曲线偏差更大。同时, 层状云降水拟合曲线一直低于对流云降水曲线, 表明相同粒径下对流云降水粒子速度高于层状云降水粒子。

2.3 降水强度与粒径的关系

利用雨滴谱资料分析降水强度与粒子平均直径和优势直径的关系, 采用最小二乘法对三种降水类型拟合结果如图2所示。

图2中横坐标为降水强度值, 纵坐标为降水粒子直径。由图2可知, 层状云与对流云降水过程中平均直径变化幅度很小, 分别分布在0.5~0.625 mm与0.437~0.562 mm。两种降水类型的优势直径均随雨强增大而增大, 分别分布在0.812~2.5 mm与0.812~3.25 mm, 分布范围较平均直径有较大区别。在相同雨强下, 层状云降水平均直径和优势直径均高于对流云降水。综合分析可知, 层状云降水中含有更少的小粒子和更多的大粒子, 这与Tokay等^[3]得出的结

由粒径小于1 mm的粒子主导。文献^[16]对2009—2010年夏季江淮梅雨锋暴雨进行分析, 得到梅雨锋暴雨以0.25~1.0 mm粒径的粒子为主, 数密度占比67%, 而对降水强度贡献最大的是1.0~2.0 mm粒径的粒子, 降水强度贡献率为54.1%。相较于本研究, 2009—2010年夏季江淮梅雨锋暴雨降水粒子粒径更大, 出现这种现象的原因是不同地区、不同季节、不同降水类型的雨滴谱分布存在显著区别, 因此需要分别进行研究。

2.5 Z-I 关系分布

由于Z-I关系随时空特性和地理特性的变化很大, 因此分析Z-I关系对安徽淮南降水特性的认识也很有

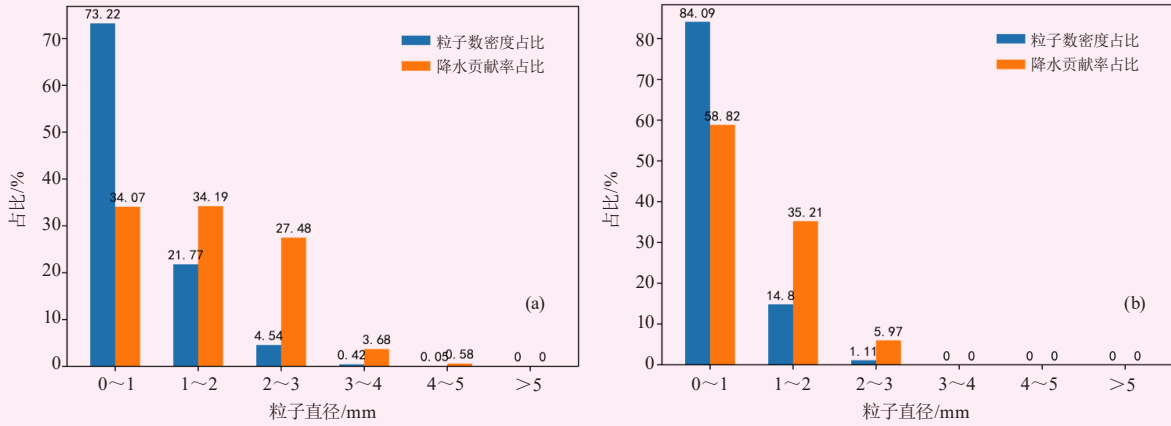


图3 安徽淮南2016年夏季降水粒子数密度分布与雨强贡献率分布
(a)对流云, (b)层状云

Fig.3 Distribution of population density and rain intensity contribution rate of summer precipitation in Huainan, Anhui in 2016
(a) convective cloud, (b) stratiform cloud

意义。

安徽淮南2016年夏季降水Z-I关系分布如图4所示。

由图4a和4b可以看出, 安徽淮南2016年夏季降水的Z-I关系图呈现指数形式的函数分布, 其中对流云降水经过拟合之后的曲线为 $Z=53.17 \times I^{1.65}$, 与雷达定量估测降水典型参考曲线相比, 系数值偏小, 指数值偏大。层状云降水的拟合曲线为 $Z=164.19 \times I^{1.21}$, 与对流云降水的Z-I关系相比, 系数值偏大, 指数值偏小, 使得整条曲线增长幅度变小, 更为平缓。文献^[16]对2009—2010年夏季江淮梅雨锋暴雨进行统计, 拟合曲线为 $Z=212 \times I^{1.38}$ 。由图4c可得, 标准Z-I关系在相同雷达反射率因子下低估了降水, 这与文献^[16]所得结论相同。

2.6 M-P 分布、Gamma 分布拟合

将安徽淮南2016年夏季降水用最小二乘法进行拟合M-P分布、Gamma分布, 拟合结果如图5所示, 横坐标为粒子直径, 纵坐标为粒子数密度。

图5a中M-P分布拟合为: $N(D)=248.86 \times e^{(-3.48D)}$, Gamma分布拟合为: $N(D)=27.94 \times D^{-1.02} \times e^{(-0.68D)}$, 经计算得M-P分布拟合相关系数为98.64%, Gamma分布拟合相关系数为99.86%。在粒径为0.437~3 mm情况下, M-P分布、Gamma分布都与实际值有一定的误差, 但Gamma分布误差更小, 这与文献^[5]中得出的结论相似。图5b中M-P分布拟合曲线: $N(D)=49.49 \times e^{(-2.52D)}$, Gamma分布拟合曲线: $N(D)=45.95 \times D^{-0.04} \times e^{(-2.43D)}$, 经计算, M-P分布拟合相关系数为99.90%, Gamma分布拟合相关系数为99.91%, 二者拟合效果基本一致。

3 结论

本文统计了安徽淮南2016年夏季降水粒子谱仪

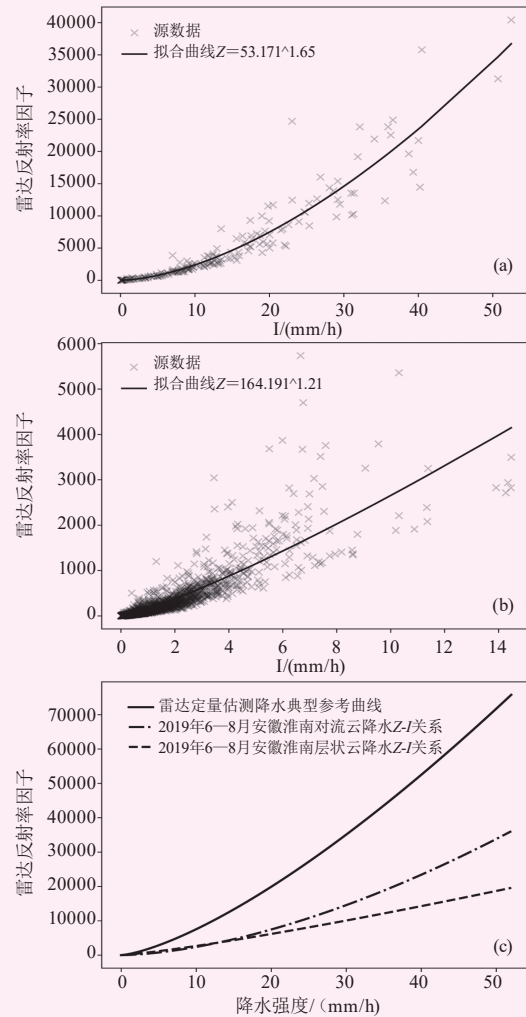


图4 安徽淮南2016年夏季降水Z-I关系图
(a)对流云, (b)层状云, (c)对比

Fig.4 Z-I relationship diagram of summer precipitation in Huainan, Anhui in 2016
(a) convective cloud, (b) stratiform cloud, (c) compare

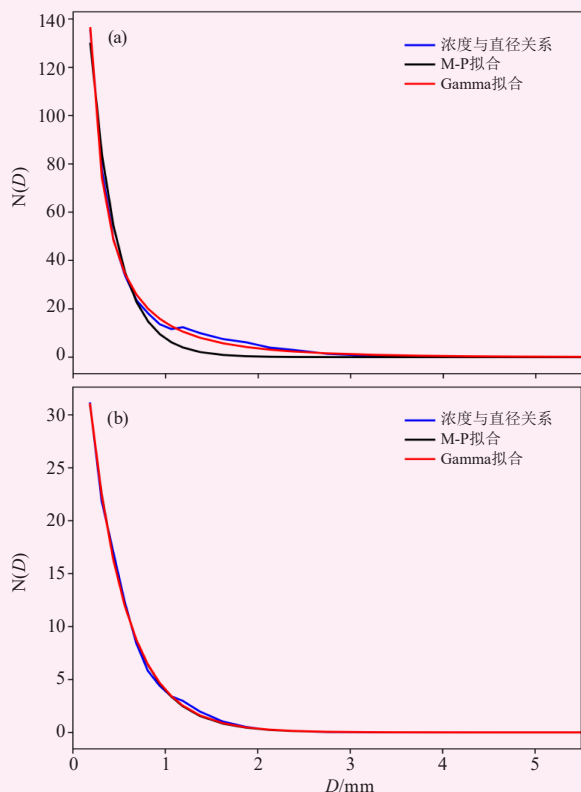


图5 安徽淮南2016年夏季降水M-P分布、Gamma分布
(a) 对流云, (b) 层状云
Fig.5 Distribution of M-P and Gamma of summer precipitation in Huainan, Anhui
(a) convective cloud, (b) stratiform cloud

的观测资料, 根据降水过程的平均雨强对降水进行分类, 研究了对流云、层状云降水的雨滴谱分布特征, 以及Z-I关系和M-P分布、Gamma分布, 结论如下。

1) 安徽淮南夏季降水过程中, 小粒径粒子下落末速度大于理想粒子下落末速度, 大粒径粒子下落末速度小于理想粒子下落末速度。对流云降水数密度大于层状云降水数密度且对流云降水粒子分布范围广。

2) 两种降水类型的平均直径变化幅度都很小, 优势直径随雨强增大而不断增大且变化幅度大; 在相同的雨强下, 层状云降水的平均直径和优势直径比对流云降水大, 反映出在相同降水强度下, 层状云降水中含有更少的小粒子和较多的大粒子。

3) 安徽淮南夏季对流云降水以0~1 mm粒子为主, 但对雨强贡献最大的则是1~2 mm粒子, 其次为0~1 mm粒子, 再次为2~3 mm粒子。层状云降水以0~1 mm粒子为主, 对雨强贡献最大的也是0~1 mm粒子, 其次为1~2 mm粒子, 再次为2~3 mm粒子。

4) 安徽淮南夏季对流云降水Z-I关系拟合曲线为 $Z=53.17 \times I^{1.65}$, 层状云降水Z-I关系拟合曲线为 $Z=164.19 \times I^{1.21}$ 。当降水强度小于14 mm/h时, 层状云

降水拟合曲线略高于对流云降水拟合曲线, 由于差值很小故可用对流云降水拟合曲线代替; 降水强度大于14 mm/h时, 层状云降水拟合曲线低于对流云降水拟合曲线。由于层状云降水强度较小, 故安徽淮南夏季Z-I关系可用对流云拟合曲线进行估测降水。与Z-I关系经验公式比较可见, 在相同雷达反射率因子下经验公式低估了降水强度。

5) 由对流云降水粒子分布拟合可以看出, 在粒径小于0.437 mm的情况下, 三条曲线几乎重合; 在粒径为0.437~3 mm情况下, M-P分布、Gamma分布都与实际值有一定的误差, 但Gamma分布误差更小; 在粒径大于3 mm情况下, 三条曲线几乎重合。由层状云降水粒子分布拟合可以看出, 两种拟合方法差别很小。综合两种情况的拟合分析, 得出Gamma分布能更准确地表现安徽淮南粒子数密度与粒子直径之间的关系。

由于本文样本较少, 仅代表2016年安徽淮南夏季降水雨滴谱特征, 若要进一步研究本地区降水特征需增加数据量以避免小样本可能带来的误差。

参考文献

- [1] 王宇, 詹同涛, 李臻. 淮河流域粮食生产的作用分析. 治淮, 2015, (12): 62-63.
- [2] 金祺, 袁野, 刘慧娟, 等. 江淮之间夏季雨滴谱特征分析. 气象学报, 2015, 73(4): 778-788.
- [3] Tokay A, Short D A. Evidence from tropical raindrop spectra of the origin of rain from stratiform versus convective clouds. Journal of Applied Meteorology, 2015, 35(3): 355-371.
- [4] 周毓荃, 刘晓天, 周非非, 等. 河南干旱年地面雨滴谱特征. 应用气象学报, 2001, 12: 39-47.
- [5] 毛志远, 黄光瑞, 黄彦彬, 等. 海南省秋季暴雨过程雨滴谱的特征分析. 海南大学学报(自然科学版), 2020, 38(1): 59-66.
- [6] 陈宝君, 李子华, 刘吉成, 等. 三类降水云雨滴谱分布模式. 气象学报, 1998, 56(4): 506-512.
- [7] 冯雷, 陈宝君. 利用PMS的GBPP-100型雨滴谱仪观测资料确定Z-R关系. 气象科学, 2009, 29(2): 192-198.
- [8] 杨宁, 张晋, 刘钧. 雨滴谱式降水现象仪降水类型判定算法优化探究. 气象科技进展, 2018, 8(6): 89-94.
- [9] 濮江平, 赵国强, 蔡定军, 等. Parsivel激光降水粒子谱仪及其在气象领域的应用. 气象与环境科学, 2007, 2: 3-8.
- [10] Tokay A, Bashor P G. An experimental study of small-scale variability of raindrop size distribution. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49(11): 2348-2365.
- [11] Battaglia A, Rustemeier E, Tokay A, et al. PARSIVEL snow observations: a critical assessment. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(2): 333-344.
- [12] Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. Doppler characteristics of precipitation at vertical incidence. Reviews of Geophysics, 1973, 11: 1-35.
- [13] Pruppacher H R, Klett J D. Microphysics of clouds and precipitation. Aerosol Science and Technology, 1998, 6: 381-382.
- [14] Ulbrich C W, Atlas D. Assessment of the contribution of differential polarization to improved rainfall measurements. Radio Science, 1984, 1: 49-57.
- [15] 王子周, 黄兴友, 胡汉峰. 淮南一次飑线过程的雨滴谱分析. 安徽农业科学, 2011, 39(10): 5954-5957, 5988.
- [16] 陈磊, 陈宝君, 杨军, 等. 2009—2010年梅雨锋暴雨雨滴谱特征. 大气科学学报, 2013, 36(4): 481-488.