

冯婉悦,施丽娟,王智敏,等,2021.雨滴谱仪资料在“温比亚”台风降水估测中的应用探究[J].气象,47(4):389-397. Feng W Y, Shi L J, Wang Z M, et al, 2021. Application of raindrop disdrometer data in rainfall estimation of Typhoon Rumbia[J]. Meteor Mon, 47(4): 389-397(in Chinese).

## 雨滴谱仪资料在“温比亚”台风降水 估测中的应用探究<sup>\*</sup>

冯婉悦<sup>1</sup> 施丽娟<sup>2</sup> 王智敏<sup>3</sup> 黄晓<sup>1</sup> 杨莲梅<sup>4</sup> 张林<sup>2</sup>

1 新疆维吾尔自治区气象技术装备保障中心, 乌鲁木齐 830002

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

3 新疆维吾尔自治区人工影响天气办公室, 乌鲁木齐 830002

4 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

**提 要:** 利用台风温比亚(1808)登陆阶段受外围云系降水影响的上海、浙江、江苏、安徽四个省(直辖市)42个雨滴谱仪站点数据,对比分析雨滴谱仪数据计算获得的雷达反射率因子、降水强度分别与雷达实测、雨量计实测的差异;进行 $Z-R$ 关系拟合,以探究台风降水回波与降水强度的关系;分别利用两种 $Z-R$ 关系进行降水估测效果对比,以探究雨滴谱仪资料在台风雷达降水估测中的应用效果。结果表明:雨滴谱仪数据计算得到的雷达反射率因子与雷达观测一致性较好,两者相关系数为0.96,前者略小于后者。雨滴谱仪数据计算得到的降水强度与雨量计观测的降水强度相比,变化趋势一致,相关系数为0.94,但在量值上,部分区域仪器存在较大的差异,其可能原因:一是该区域内仪器本身系统误差,二是受台风大风影响,雨滴下落速度快,容易发生破碎、重叠等,使到达地面的雨滴直径、数目产生一定的误差。台风温比亚外围云系降水回波与强度的拟合公式: $Z=188.85R^{1.42}$ ,利用此关系的估测效果优于默认关系 $Z=300R^{1.4}$ ,估测降水量提高近17%左右。

**关键词:** 台风温比亚,雨滴谱,雷达回波,降水强度, $Z-R$ 关系

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.04.001

## Application of Raindrop Disdrometer Data in Rainfall Estimation of Typhoon Rumbia

FENG Wanyue<sup>1</sup> SHI Lijuan<sup>2</sup> WANG Zhimin<sup>3</sup> HUANG Xiao<sup>1</sup> YANG Lianmei<sup>4</sup> ZHANG Lin<sup>2</sup>

1 Xinjiang Meteorological and Technical Equipment Support Center, Urumqi 830002

2 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

3 Xinjiang Weather Modification Office, Urumqi 830002

4 Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002

**Abstract:** Based on the raindrop disdrometer data of 42 stations in Shanghai, Zhejiang, Jiangsu and Anhui during the precipitation process of Typhoon Rumbia (1808), this paper compares and analyzes the difference between the radar reflectivity calculated from raindrop size distribution and the actual measurement based on radar, and the difference between the raindrop size distribution inversion rain rate and gauge actual observation. The  $Z-R$  relationship fitting is carried out to explore the relationship between radar echo and the precipitation intensity of typhoon. Two kinds of  $Z-R$  relations are used for comparative analysis of

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划(2018YFC1507102)和中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2019007)共同资助

2020年4月16日收稿; 2020年12月18日收修定稿

第一作者:冯婉悦,主要从事雷达技术研究、大气探测研究. E-mail:610320128@qq.com

通讯作者:施丽娟,主要从事综合气象观测产品系统研发研究. E-mail:shilj@cma.gov.cn

precipitation estimation so as to explore the application effect of raindrop size distribution. The main results are as follows. The radar reflectivity factor of raindrop disdrometers inversion is consistent with radar observation, with correlation coefficient being 0.96, and the former is slightly smaller than the latter. Comparison suggests that the rainfall intensity observed by rain gauge and the precipitation intensity calculated by raindrop disdrometer data have the almost same varying trend, and their correlation coefficient is 0.94. However, the values from some instruments have great differences in some regions, which may be caused by the system error of the instrument itself in the region, and also by the influence of typhoon. When raindrops fall to the ground, the falling speed is fast so that they are easy to break, overlap, etc. This could cause some errors in the diameter and number of drops. In addition, the fitting formula of precipitation echo and intensity of the cloud system around the Typhoon Rumbia is  $Z=188.85R^{1.42}$ . The estimation effect by using this relationship is better than using the default relationship  $Z=300R^{1.4}$ , increasing by about 17% of precipitation estimation.

**Key words:** Typhoon Rumbia, raindrop size distribution, radar echo, precipitation intensity,  $Z$ - $R$  relationship

## 引 言

台风暴雨作为影响我国东南部沿海地区的主要灾害天气之一,通常给受影响地区造成较大的经济损失。特别是台风温比亚(1808)横跨上海、浙江、安徽、河南、山东等省(直辖市),影响范围广,给当地造成了巨大的经济损失。近年来,随着我国多种探测设备多源资料融合应用的研究发展,使得降水估测准确性不断提高。Bent(1943)提出雷达估测降水的概念,而雷达定量估测降水最常用的方法是雷达反射率因子-雨强( $Z$ - $R$ )关系法,即  $Z=AR^b$ ,我国新一代天气雷达沿用 WSR-88D 默认降水估测关系  $Z=300R^{1.4}$ ,但  $Z$ - $R$  关系随地域、时间和降水性质等发生变化,如果能够针对某一地区、季节或降水类型建立更好的  $Z$ - $R$  关系,那么就可以减小雷达估测降水的不确定性(李慧等,2018;梅海霞等,2017;吴亚昊等,2016)。尤其是台风降水与其他降水存在很大不同,为此需要对台风系统降水的  $Z$ - $R$  关系分阶段、分类型进行细致研究。

目前  $Z$ - $R$  关系分析研究主要借助于地面雨量计或雨滴谱仪资料。虽然雨滴谱仪资料在雷达定量估测降水中的应用已有学者做了大量研究工作,但主要围绕一般降水过程中的对流云、层状云、混合云不同降水类型进行研究。冯雷和陈宝君(2009)利用 GBPP-100 型地面雨滴谱仪资料,分析了三类降水云  $Z$ - $R$  关系,指出  $Z=AR^b$  形式能够很好地描述三种降水类型的  $Z$ - $R$  关系。陈磊(2011)、黄兴友等

(2019)、金祺等(2015)利用雨滴谱仪资料,分别分析了淮南、南京梅雨锋暴雨,南京层状云和积雨云,安徽滁州飊线过程的雨滴谱特征和  $Z$ - $R$  关系。而针对台风降水估测,何宽科等(2007)、冀春晓等(2008),主要利用雨量计资料进行研究,雨滴谱仪资料应用相对很少。另一方面,多数研究工作中所用的雨滴谱仪资料基本上集中于某一区域(省份)的几个站点,而利用多省雨滴谱仪数据针对台风不同发展阶段的降水估测相关研究基本没有。朱红芳等(2019)、李侠丽等(2019)分别仅利用滁州、寿县 1 部雨滴谱仪数据,讨论台风海葵和麦德姆、苏迪罗的  $Z$ - $R$  关系。晋立军等(2012)利用汾阳、介休 2 部雨滴谱仪,张扬等(2016)使用 13 部雨滴谱仪,分别分析了山西、苏州地区普通降水过程的  $Z$ - $R$  关系。这些研究用到的雨滴谱仪少,而台风降水过程复杂,影响范围大,若只用几个站点雨滴谱仪资料,短时间内数据不足,无法进行台风降水  $Z$ - $R$  关系实时拟合。

由于台风天气系统复杂,而利用雨滴谱仪资料对登陆我国的台风降水过程分阶段进行细致研究相对较少,同时确定  $Z$ - $R$  关系需要大量的雨滴谱资料。为此,本文利用多省的 42 部雨滴仪数据,以台风温比亚为例,参考郑怡等(2019)的分析,将台风降水分为三个阶段,重点研究受台风外围螺旋云系影响降水过程。本文研究意义在于,其一,结合台风路径,利用上海、江苏、浙江、安徽多省(直辖市)多部雷达、雨量计、雨滴谱仪收集到的台风温比亚资料,分析讨论雨滴谱特征及雨滴谱仪数据与雷达、雨量计数据的一致性,探讨雨滴谱仪数据可用性。其二,通

过  $Z-R$  关系拟合和降水效果评估,探究台风降水回波和降水强度的关系。以期建立适合台风降水系统的  $Z-R$  关系奠定基础,为雨滴谱仪资料在多源融合降水估测中发挥其数据效益有所指导。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

#### 1.1.1 台风概况和资料来源

台风温比亚生成于西太平洋,2018年8月17日04时左右在我国上海浦东新区南部登陆,登陆后持续向偏北方向移动,于21日变性为温带气旋移入黄海。台风路径如图1(绿色实线所示)。整个温比亚台风降水过程分为三个阶段:受台风外围螺旋云系影响的降水;受倒槽影响的降水;受变性后温带气旋冷锋的降水。本文重点研究8月17日04—14时(北京时,下同)受外围螺旋云系影响的降水,该段时间为台风螺旋雨带开始影响我国东部沿海地区至外围螺旋云系结束影响的过程。

本文所用数据包括雷达基数据、雨滴谱仪数据、雨量计数据。台风路径和站点分布如图1所示。

(1)雷达基数据。从雷达型号的一致性及数据质量方面考虑出发,结合台风路径,选择合肥、蚌埠、安庆、阜阳、铜陵、南京、常州、淮安、泰州、南通、杭州、湖州、宁波、青浦等共14部天气雷达(CINRAD/SA)基数据,数据经过地物杂波抑制、电磁干扰消除、噪声消除的质量控制处理。

(2)雨滴谱仪数据。选取以雷达站为中心,距离每部雷达约为30~60 km的3个雨滴谱仪站点[除青浦雷达-松江雨滴谱仪(22 km)、合肥雷达-肥东雨滴谱仪(22 km)外],共计42个雨滴谱仪站点数据。目前,大多数雨滴谱仪数据相关应用研究只用到了100型雨滴谱仪资料。文中所用雨滴谱仪资料包括100型和200型。100型和200型均采用Pasival激光雨滴谱仪测量原理捕获降水粒子直径和速度分布,根据计算公式,得到雷达反射率因子  $Z$ 、降水强度  $R$  等参数。100型雨滴谱仪为32(粒子直径通道0.062~24.5 mm)×32(粒子速度通道0.05~20.8 m·s<sup>-1</sup>)通道,采样面积为54 mm<sup>2</sup>,200型为22(粒子直径通道0.062~7.75 mm)×20(粒子速度通道0.1~10.0 m·s<sup>-1</sup>)通道,采样面积为48 mm<sup>2</sup>,两种型号数据采样时间均为1 min。

(3)雨量计数据。本文选取两组雨量计数据:一组用于数据一致性对比验证,该组雨量计选取与雨滴谱仪同一站点(同一经纬度)的雨量计,以避免因为距离太远,造成较大的误差,如图1中所示;另一组雨量计数据用于拟合的  $Z-R$  关系效果评估,其站点分布在后文中介绍。两组雨量数据均为1 h间隔。

#### 1.1.2 雨滴谱仪数据质量控制

在使用雨滴谱仪数据前,为减少雨滴谱仪带来的数据误差,首先对雨滴谱仪数据进行质量控制。自然界中很少有直径大于8 mm的粒子,Willis(1984)研究1977年的飓风Anita时发现,即使在雨强非常大的情况下,最大粒子直径也不超过4 mm,且大粒子数很少。同时,在雨滴下落过程中,发生的碰撞、重叠等都会使粒子分布在直径-速度关系范围以外(Kim et al,2013)。此外,前两通道降水粒子的直径值过小;粒子总数目过小;降水量过小等都需要将其剔除,以提高数据可用性(Tokay and Bashor,2010)。为此,本文选用的质量控制方法包括:剔除订正后雨滴直径大于8 mm的观测数据;参考Jaffrain and Berne(2011)的方法,剔除直径-速度经验关系范围以外的粒子,阈值设为60%;剔除前两个尺度档(直径<0.3 mm)的观测数据;剔除计算雨强过小(<0.01 mm·h<sup>-1</sup>)的数据;选取原始粒子数目大于10的样本(Ji et al,2019)。在后文中,对质量控制过程和结果进行详细分析。

## 1.2 方法

### 1.2.1 雨滴谱特征参量

利用雨滴谱仪各通道粒子数目及降水参数计算公式,可计算得到数浓度、液态含水量、降水强度、降水回波强度等降水特征量(熊飞麟和周毓荃,2016)。以32×32通道的雨滴谱仪为例,本文中所用到的雨滴数密度  $N(D_i)$ (m<sup>-3</sup>·mm<sup>-1</sup>)、雷达反射率因子  $Z$ (mm<sup>6</sup>·m<sup>-3</sup>)(假设瑞利散射和球形粒子;Battan,1973)、降水强度  $R$ (mm·h<sup>-1</sup>)计算公式如下:

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

$$Z = \sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^6 \Delta D_i \quad (2)$$

$$R = \frac{6\pi}{10^4} \sum_{i=1}^{32} N(D_i) V_j D_i^3 \Delta D_i \quad (3)$$

式中: $n_{ij}$ 代表尺度第*i*档、速度第*j*档的实测降水粒

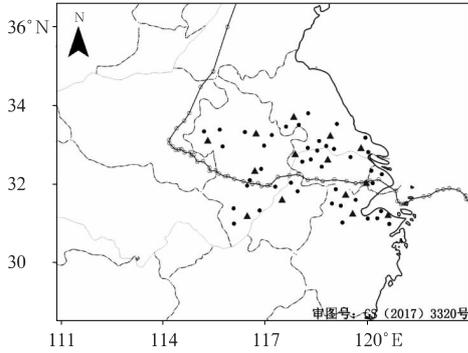


图 1 雷达、雨滴谱仪站、雨量站分布示意及台风温比亚路径

(三角表示雷达;圆点为雨滴谱仪和雨量计,经纬度相同;实线为台风路径)

Fig. 1 Distribution of radar, raindrop spectrometer and rainfall station, and path of Typhoon Rumbia

(triangle: radar; dot: raindrop spectrometer and automatic station, same latitude and longitude; solid line: typhoon path)

子数;  $V_j$  为第  $j$  档降水粒子的下落末速度, 单位为  $m \cdot s^{-1}$ ;  $\Delta D_i$  为第  $i$  个粒径通道宽度, 单位为  $mm$ ;  $\Delta T$  为取样时间, 单位为  $s$ ;  $A$  为采样面积, 单位为  $mm^2$ 。对于 200 型仪器, 在计算时, 将  $i$  最大值设为 22,  $j$  最大值设为 20 即可。从式(1)~式(3)中可以看出, 雨滴数密度  $N(D_i)$ 、雷达反射率因子  $Z$  与降水强度  $R$  三者之间具有很大的相关性。

### 1.2.2 $Z$ - $R$ 关系拟合

雷达反射率因子  $Z$  与降水强度  $R$  之间关系可通过式(4)表示(冯雷和陈宝君, 2009), 由此关系可根据反射率因子计算降水强度。

$$Z = R^b \quad (4)$$

在气象业务中通常用  $dBZ$  表示回波强度, 两者之间的关系为  $dBZ = 10 \lg Z$ 。由式(4), 取对数后得到  $\lg Z = b \lg R + \lg A$ , 利用最小二乘法, 即可求得系数  $A$ , 指数  $b$ 。

### 1.2.3 降水估测效果评估

为确定拟合出的  $Z$ - $R$  关系有效性, 在雷达观测范围内, 与雷达默认使用的  $Z = 300R^{1.4}$  进行降水估测对比分析。选择一组雨量计数据进行降水关系效果评估, 以评估组雨量计  $Q_g$  为标准, 选取平均相对误差 ( $A_{re}$ ) 和估测结果逐小时进行对比,  $A_{re}$  越小表明误差越小(勾亚彬等, 2014)。

## 2 数据质量控制结果分析

以江苏南京站, 瞬时雷达反射率因子最大时刻

(12:53, 44.7  $dBZ$ ), 浙江德清站雨滴谱仪, 瞬时雷达反射率因子最大时刻(12:49, 50.3  $dBZ$ )为例, 来对研究中所用雨滴谱仪数据质量方法做分析说明。

100 型滴谱仪(图 2a)前两尺度档无降水粒子, 且降水粒子较为均匀分布于直径-速度关系两侧, 200 型滴谱仪(图 2b)前两尺度档粒子数量多且速度范围比较广。调查发现 100 型雨滴谱仪在设备端已经过初步质量控制, 原始数据质量略优于 200 型雨滴谱仪。并且通过分析发现, 剔除前两尺度档观测数据对质量控制结果影响不大。

参考 Jaffrain and Berne(2011)的方法, 进行数据质量控制后(图 2c), 降水粒子都分布在直径-速度经验关系  $\pm 60\%$  以内。但通过研究发现, 在台风降水中, 直径较小降水粒子下落速度很快, 降水粒子多数分布在直径-速度经验关系偏上部分。

为保证所用雨滴谱仪数据质量控制方法的可靠性, 将经质量控制后的雨滴谱仪数据与同一地点的雨量计结果进行对比。图 3 为雨滴谱仪数据质量控制前后计算得到的雨强逐小时累加  $R$  与雨量计实测对比。从结果来看, 进行数据质量控制后, 拟合直线更接近于  $y=x$ , 即经过文中质量控制方法后, 两者偏差有所减小, 表明文中所用的质量控制方法和进行质量控制后的雨滴谱数据是可靠的。但常规雨滴谱仪数据质量控制方法对于台风降水的普遍适用性还需结合更多台风个例进行深入研究。

## 3 数据一致性分析

利用雷达-雨量计-雨滴谱仪联合估测降水具有一定的实用价值。在利用雨滴谱仪数据进行降水估测时, 为确保拟合  $Z$ - $R$  关系的可靠性, 首先需要确定雨滴谱仪数据的有效性。为此, 需要验证雨滴谱仪数据计算出的反射率因子  $Z_d$  与雷达反射率因子  $Z_r$ , 降水强度  $R_d$  与雨量计雨量  $R_g$  的一致性。

### 3.1 回波强度对比分析

雨滴谱仪数据代表的是单点资料, 而雷达为面资料, 在空间一致性对应时, 选择雷达站对应的雨滴谱仪垂直上方附近的雷达数据库  $Z_5$ , 即 5 点平均法(晋立军等, 2012), 然后, 将每部雷达所对应的 3 部雨滴谱仪的  $Z_5$  再次进行平均作为  $Z_r$ 。在时间一致性上, 为保证雨滴谱仪数据与雷达数据能够匹配, 利用所选雨滴谱仪数据计算出的雷达反射率因子, 每

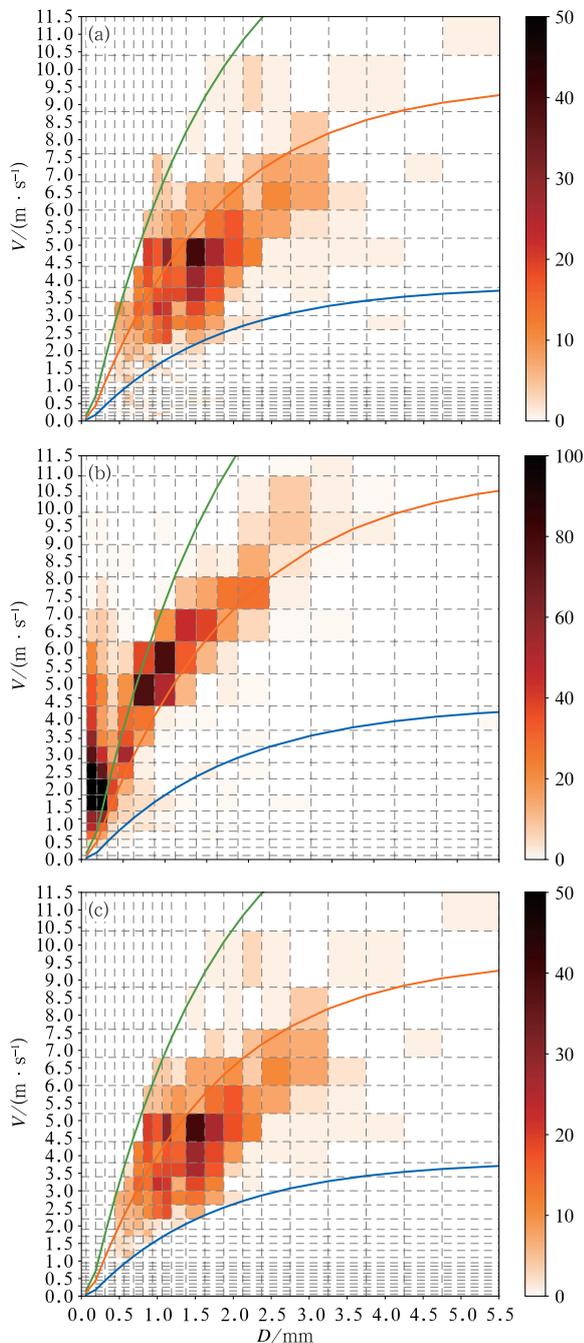


图 2 粒子分布谱及数据质量控制过程分析  
 (a) 江苏南京 100 型质量控制前, (b) 浙江德清站 200 型质量控制前, (c) 江苏南京 100 型质量控制后  
 Fig. 2 Distribution of particle spectrum and analysis of data quality control process  
 (a) Type 100, before data quality control for Nanjing Station, Jiangsu Province,  
 (b) Type 200, before data quality control for Deqing Station, Zhejiang Province,  
 (c) Type 100, after data quality control for Nanjing Station, Jiangsu Province

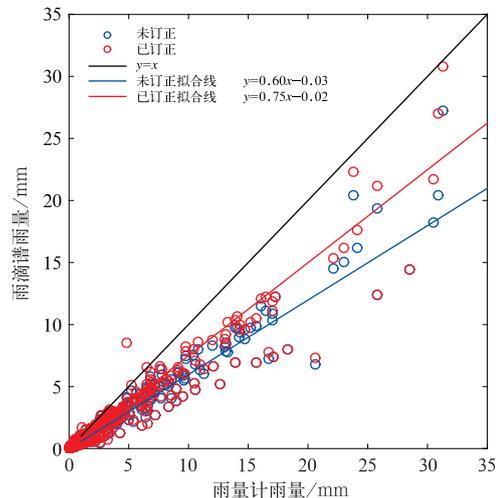


图 3 雨量计实测小时雨量与雨滴谱仪数据质量控制前后计算得到雨量的对比  
 Fig. 3 Comparison of hourly rainfall measured by gauge and calculated from disdrometer data before and after quality control

6 min 进行一次数据平均, 得到间隔 6 min 的  $Z_d$ , 与雷达直接测量的  $Z_r$  进行对比分析, 同时滤除无效数据, 如有雷达回波无雨滴谱数据, 无雷达回波无雨滴谱数据, 在进行数据匹配时, 进行滤除。

在  $Z_d$  和  $Z_r$  一致性分析中, 以合肥雷达、杭州雷达、南京雷达、青浦雷达和其分别对应的 3 部雨滴谱仪为例, 雷达与雨滴谱仪对应关系如表 1 所示。

表 1 雷达与雨滴谱仪对应关系  
 Table 1 Correspondence location of radar and disdrometer

雷达站	雨滴谱仪	距离/km
青浦	嘉定	41.09
	浦东	53.59
	松江	21.66
杭州	富阳	44.82
	上虞	52.41
	德清	44.64
南京	南京	34.48
	仪征	45.06
	芜湖	54.11
合肥	肥东	21.55
	舒城	53.95
	肥西	34.87

由于所选的雨滴谱仪站点距离雷达为 30 ~ 60 km, 为此选取  $0.5^\circ$  仰角数据。根据上述雷达和雨滴谱仪数据匹配处理方法, 得到  $Z_d$  和  $Z_r$  对比 (图 4), 由图可见, 从整体趋势来看,  $Z_d$  与  $Z_r$  具有较好的一致性, 结果相差不大, 且  $Z_d$  略小于  $Z_r$ , 此结

果与晋立军等(2012)、沙修竹等(2019)研究结果一致。整个降水过程所有样本的  $Z_d$  与  $Z_r$  相关系数为 0.96,且偏差随雷达反射率因子强度变化(图 5),随着雷达反射率因子(降水)增大,两者偏差减小,此结

果与张扬等(2016)研究结果一致,在降雨较小时( $\leq 20$  dBz),标准偏差约为 4.4 dBz;降雨较大时( $>20$  dBz),标准偏差约为 2.5 dBz。

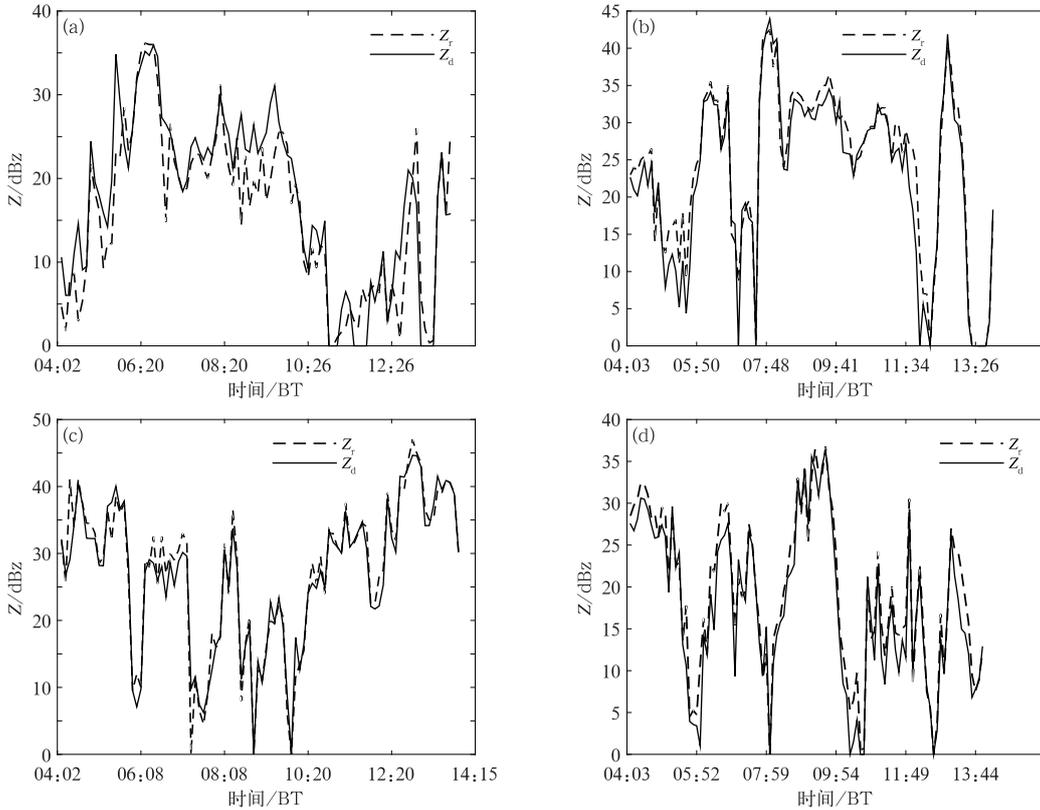


图 4 青浦(a),杭州(b),南京(c)和合肥(d)雷达实测  $Z$  值( $Z_r$ )与雨滴谱仪数据计算  $Z$  值( $Z_d$ )的对比  
 Fig. 4 Comparison between  $Z$  measured by radar ( $Z_r$ ) and  $Z$  calculated by disdrometer ( $Z_d$ ) at stations of Qingpu (a), Hangzhou (b), Nanjing (c) and Hefei (d)

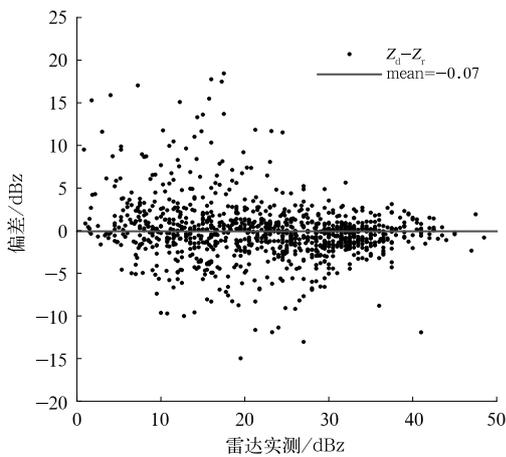


图 5 偏差随雷达反射率因子强度变化  
 Fig. 5 Variation of deviation with radar reflectivity

### 3.2 降水量对比分析

将整个外围云系降水过程(10 h)的所有样本计算出的瞬时  $R_d$  逐小时累加,得到小时雨量,与其同一站点雨量计的小时雨量进行对比分析。

在  $R_d$  和  $R_g$  一致性分析中,整个降水过程所有样本的累加  $R_d$  与雨量计  $R_g$  的相关性,如图 6 所示,整个降水过程,两者整体变化趋势具有较好的一致性,相关系数为 0.94,但两者估测误差较大,两者的偏差随着雨量增大而增大,降雨较小时(小时降水量  $\leq 8$  mm),标准偏差约为 2.04 mm,降雨较大时(小时降水量  $>8$  mm),标准差约为 2.85 mm。将各省份两种类型雨滴谱仪数据分别统计分析,发现不同省份雨滴谱仪估测偏差不同,安徽省 15 部雨滴谱仪估测的平均相对误差为 10%~55%,浙江省 9 部

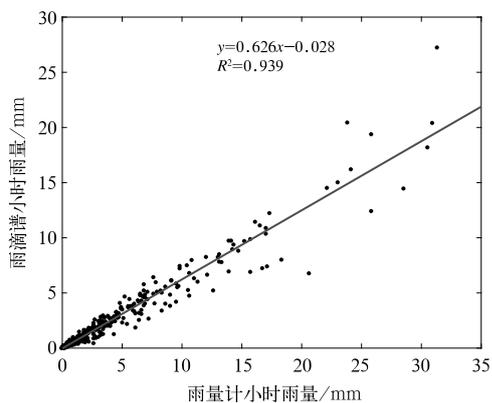


图 6 雨滴谱仪数据计算得到小时雨量与雨量计实测对比

Fig. 6 Comparison of hourly rainfall calculated by disdrometer and measured by rain gauge

雨滴谱仪的平均相对误差为 10%~50%，江苏省 15 部雨滴谱仪的平均相对误差为 3%~40%，上海市 3 部雨滴谱仪的平均相对误差为 6%~10%。同一省份不同类型仪器数据质量也不同(杜传耀等,2019)。整体来讲,100 型雨滴谱仪估测结果要优于 200 型,从图 2 中也可以看出,100 型雨滴谱仪测量时已将前两通道粒子进行了初步质量控制,200 型观测数据未经过任何质量控制,但此结论需要更长时间序列,更多资料进一步验证。

究其原因,一是不同批次仪器本身系统误差不同,二是受台风的影响,雨滴下落速度快,容易发生破碎、重叠等,使到达地面的雨滴直径、数目产生一定的误差,而从式(3)可知,降水强度与降水粒子直径和数目有关,从而导致计算出的降水存在一定的误差(吕童,2018;沙修竹等,2019)。同时,由于两种仪器精度同为 mm,当降水量级越小,误差对观测结果产生的影响比重增大,例如两者观测降水量分别为 0.1、0.2 mm 时,相对误差值达到 50%。

## 4 降水估测分析

### 4.1 Z-R 关系拟合特征

雷达定量估测降水是通过 Z-R 关系来反演降水(刘红燕等,2008)。但 Z-R 关系随地点、降水类型或季节而不同,为提高台风系统的雷达定量估测降水精度,需要对登陆我国的台风系统降水 Z-R 关系有更好的认识。本文考虑到冰雹阈值等影响,将

53 dBz 作为转换降水反射率因子上限值,又考虑最小降水强度,设置降水反射率因子下限值为 10 dBz。利用雨滴谱仪数据计算出的  $Z_a$ 、 $R_a$ ,样本数为 6318 个,利用最小二乘法,得到一组 Z-R 关系,如图 7 所示,系数 A 为 188.85,指数 b 为 1.42。该结果与 Chang et al(2009)研究 13 个台风系统得出的产生于太平洋台风 Z-R 关系:  $Z = 206.83R^{1.45}$ ,以及吕童(2018)研究台风天鸽、帕克 Z-R 结果具有一致性。

### 4.2 降水估测效果分析

本文选取与图 1 中的青浦、杭州、常州等 10 部雷达站点同一名称的雨量计数据(除淮安雷达-洪泽自动站),雷达-雨量计两者距离均为 10 km 左右(除南京雷达-南京自动站约为 34 km),作为评估组来检验和评估统计得到的 Z-R 关系在台风外围云系降水过程中的适用性(汪学渊等,2016)。同时利用由美国 WSR-88D 设定并在我国新一代天气雷达一直沿用的  $Z = 300R^{1.4}$  作为参考,进行降水估测效果对比分析,如图 8 所示。

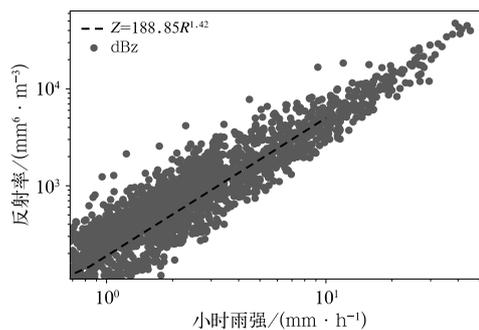


图 7 雨滴谱 Z-R 拟合曲线

Fig. 7 Z-R fitting curve of disdrometer

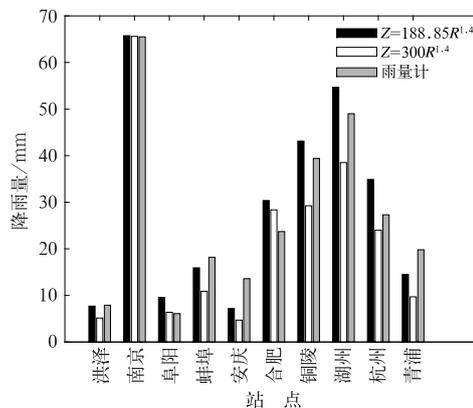


图 8 估测雨量与实测雨量

Fig. 8 Estimated and measured rainfall

由图 8 可以看出,利用雨滴谱仪  $Z_d-R_d$  进行降水估测多数是高估降水量,利用  $Z=300R^{1.4}$  估测降水容易低估降水量,安庆站的相对误差可达 65%。整体来看,雨滴谱仪  $Z_d-R_d$  估测的平均  $A_{re}$  约为 5%,利用默认降水估测关系的  $A_{re}$  为 22%,利用雨滴谱仪降水估测关系比利用默认  $Z-R$  关系提高近 17%左右。整体来讲,利用雨滴谱仪  $Z_d-R_d$  降水估测效果要优于默认  $Z=300R^{1.4}$  估测降水。但因为台风系统和  $Z-R$  关系的复杂性,建立适用于台风降水估测的  $Z-R$  关系还需要更多个例和数据来进一步深入研究。

## 5 结论与讨论

本文以台风温比亚外围云系降水过程为例,在分析上海、安徽、浙江、江苏四个省(直辖市)雨滴谱仪数据、雷达数据和雨量计数据一致性的基础上,利用雨滴谱仪数据计算得到的雷达反射率因子和降水强度建立  $Z-R$  关系,并与经典降水估测关系  $Z=300R^{1.4}$  进行了降水估测效果对比,主要结论如下:

(1)在此次台风外围云系降水中,利用雨滴谱仪数据计算出的雷达反射率因子与雷达实测具有较好的一致性,两者相关系数为 96%。

(2)降水强度与雨量计估测值误差相对较大,但其变化趋势一致,相关系数为 94%。分析量值产生较大误差的原因,其可能原因:一是该区域内仪器本身系统误差;二是受台风的影响,雨滴下落速度快,容易发生破碎、重叠等,导致降水计算产生误差。同时,当降水量级很小时,仪器本身毫米级精度对误差结果造成影响的比重也随之增大。

(3)在整个外围云系降水过程中,对选取的评估组 10 个雨量计站点而言,利用雨滴谱仪数据拟合出的  $Z-R$  关系估测降水总量与雨量计实测更为接近,估测降水效果更好,与默认关系  $Z=300R^{1.4}$  相比,提高了近 17%。

(4)本文只是针对台风温比亚个例的降水估测,该研究结果对提高台风降水中雨滴谱仪资料分析,以及联合雷达、雨量计等观测数据进行降水估测具有一定的参考意义。后续还需要对整个台风温比亚过程以及更多台风个例分析,得出更加合理的适用于台风降水  $Z-R$  关系。同时,发现部分地区雨滴谱仪与雨量计实测存在一定的比例关系,可能是仪器本身系统误差,这可作为深入评估全国雨滴谱仪数

据甚至降低雷达定量估测误差并进入业务化应用的一个很好的方向。

## 参考文献

- 陈磊,2011.2009—2010 年江淮梅雨锋暴雨雨滴谱特征的观测分析[D].南京:南京信息工程大学. Chen L,2011. Analysis on the features of raindrop size distribution in Meiyu front during 2009—2010[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 杜传耀,尹佳莉,李林,等,2019.降水现象仪观测应用评估[J].气象,45(5):730-737. Du C Y, Yin J L, Li L, et al,2019. Application evaluation of precipitation phenomenon instrument observation [J]. Meteor Mon,45(5):730-737(in Chinese).
- 冯雷,陈宝君,2009.利用 PMS 的 GBPP-100 型雨滴谱仪观测资料确定  $Z-R$  关系[J].气象科学,29(2):192-198. Feng L, Chen B J, 2009. The radar reflectivity-rainrate relationships as inferred from ground-based raindrop spectra observed by GBPP-100 probe[J]. Sci Meteor Sin,29(2):192-198(in Chinese).
- 勾亚彬,刘黎平,杨杰,等,2014.基于雷达组网拼图的定量降水估测算法业务应用及效果评估[J].气象学报,72(4):731-748. Gou Y B, Liu L P, Yang J, et al,2014. Operational application and evaluation of the quantitative precipitation estimates algorithm based on the multi-radar mosaic[J]. Acta Meteor Sin,72(4):731-748 (in Chinese).
- 何宽科,范其平,李开奇,等,2007.舟山地区台风降水  $Z-R$  关系研究及其应用[J].应用气象学报,18(4):573-576. He K K, Fan Q P, Li K Q, et al,2007.  $Z-R$  relation with its application to typhoon precipitation in Zhoushan[J]. J Appl Meteor Sci,18(4): 573-576(in Chinese).
- 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).
- 冀春晓,陈联寿,徐祥德,等,2008.多普勒雷达资料动态定量估测台风小时降水量的研究[J].热带气象报,24(2):147-155. Ji C X, Chen L S, Xu X D, et al,2008. A study on variable quantitative precipitation estimation using Doppler radar data[J]. J Trop Meteor,24(2):147-155(in Chinese).
- 晋立军,封秋娟,李军霞,等,2012.自动激光雨滴谱仪在雷达降水估测中的应用[J].气候与环境研究,17(6):740-746. Jin L J, Feng Q J, Li J X, et al,2012. Application of automatic laser raindrops spectrometer in radar rainfall estimation[J]. Climatic Environ Res,17(6):740-746(in Chinese).
- 金祺,袁野,纪雷,等,2015.安徽滁州夏季一次飑线过程的雨滴谱特征[J].应用气象学报,26(6):725-734. Jin Q, Yuan Y, Ji L, et al,2015. Characteristics of raindrop size distribution for a squall line at Chuzhou of Anhui during summer[J]. J Appl Meteor Sci,26(6):725-734(in Chinese).

- 李慧,银燕,单云鹏,等,2018. 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,42(2):268-280. Li H, Yin Y, Shan Y P, et al, 2018. Statistical characteristics of raindrop size distribution for stratiform and convective precipitation at different altitudes in Mt. Huangshan[J]. Chin J Atmos Sci, 42(2):268-280(in Chinese).
- 李侠丽,潘先洁,童应祥,等,2019. 两次强降水过程雨滴谱特征及差异[J]. 气象科技,47(2):322-328. Li X L, Pan X J, Tong Y X, et al, 2019. Raindrop spectral characteristics of two different types of heavy precipitation based on raindrop spectral data[J]. Meteor Sci Technol, 47(2):322-328(in Chinese).
- 刘红燕,陈洪滨,雷恒池,等,2008. 利用2004年北京雨滴谱资料分析降水强度和雷达反射率因子的关系[J]. 气象学报,66(1):125-129. Liu H Y, Chen H B, Lei H C, et al, 2008. Relationship between rain rate and radar reflectivity based on the raindrop distribution data in Beijing during 2004[J]. Acta Meteor Sin, 66(1):125-129(in Chinese).
- 吕童,2018. 登陆台风雨滴谱特征观测研究[D]. 南京:南京大学. Lyu T, 2018. Observation study of the characteristics of raindrop size distribution of landing falling typhons[D]. Nanjing: Nanjing University(in Chinese).
- 梅海霞,郭文刚,周林义,等,2017. 雨滴谱形参数对梅雨降水模拟能力的影响[J]. 气象,43(1):34-45. Mei H X, Guo W G, Zhou L Y, et al, 2017. Effect of shape parameter of raindrop spectrum on the simulation of Meiyu rainfall[J]. Meteor Mon, 43(1):34-45(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 raindrop disdrometer[J]. Meteor Mon, 45(11):1569-1578(in Chinese).
- 汪学渊,阮征,李效东,等,2016. 雨滴谱仪与风廓线雷达反射率对比试验[J]. 气象,42(1):107-114. Wang X Y, Ruan Z, Li X D, et al, 2016. Comparison of the reflectivities of wind profile radar and raindrop disdrometer[J]. Meteor Mon, 42(1):107-114(in Chinese).
- 吴亚昊,刘黎平,周筠珺,等,2016. 雨滴谱的变化对降水估测的影响研究[J]. 高原气象,35(1):220-230. Wu Y H, Liu L P, Zhou J J, et al, 2016. Study of raindrop influence of spectrum change on precipitation estimation[J]. Plat Meteor, 35(1):220-230(in Chinese).
- 熊飞麟,周毓荃,2016. 估算雨滴谱 $\Gamma$ 分布三参数的阶矩法研究[J]. 气象,42(7):777-789. Xiong F L, Zhou Y Q, 2016. Study of moment methods in estimating three parameters of gamma raindrop size distribution[J]. Meteor Mon, 42(7):777-789(in Chinese).
- 张扬,刘黎平,何建新,等,2016. 雨滴谱仪网数据在雷达定量降水估测中的应用[J]. 暴雨灾害,35(2):173-181. Zhang Y, Liu L P, He J X, et al, 2016. Application of raindrop size distribution data from a disdrometer network to quantitative precipitation estimation[J]. Torr Rain Dis, 35(2):173-181(in Chinese).
- 郑怡,杨晓霞,孙晶,2019. 台风“温比亚”(1818)造成山东极端强降水的成因分析[J]. 海洋气象学报,39(1):106-115. Zheng Y, Yang X X, Sun J, 2019. Causal analysis of extremely heavy precipitation in Shandong Province caused by Typhoon Rumbia (2018)[J]. J Mar Meteor, 39(1):106-115(in Chinese).
- 朱红芳,杨祖祥,王东勇,等,2019. 进入内陆的两个台风降水特征对比分析[J]. 气象学报,77(2):268-281. Zhu H F, Yang Z X, Wang D Y, et al, 2019. Comparative analysis of the rainstorms caused by two typhoons in inland China[J]. Acta Meteor Sin, 77(2):268-281(in Chinese).
- Battan L J, 1973. Radar Observation of the Atmosphere[M]. Chicago: University of Chicago Press.
- Bent A E, 1943. Radar Echoes from Atmospheric Phenomena[M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Radiation Laboratory Press.
- Chang W Y, Chen Wang T C, Lin P L, 2009. Characteristics of the raindrop size distribution and drop shape relation in typhoon systems in the western Pacific from the 2D video disdrometer and NCU C-band polarimetric radar[J]. J Atmos Oceanic Technol, 26(10):1973-1993.
- Jaffrain J, Berne A, 2011. Experimental quantification of the sampling uncertainty associated with measurements from PARSIVEL disdrometers[J]. J Hydrometeorol, 12(3):352-370.
- Ji L, Chen H N, Li L, et al, 2019. Raindrop size distributions and rain characteristics observed by a PARSIVEL disdrometer in Beijing, Northern China[J]. Remote Sens, 11(12):1479.
- Kim D K, Kim Y H, Chung K Y, 2013. Vertical structure and microphysical characteristics of Typhoon Kompasu (2010) at landfall[J]. Asia-Pacific J Atmos Sci, 49(2):161-169.
- Tokay A, Bashor P G, 2010. An experimental study of small-scale variability of raindrop size distribution[J]. J Appl Meteorol Climatol, 49(11):2348-2365.
- Willis P T, 1984. Functional fits to some observed drop size distributions and parameterization of rain[J]. J Atmos Sci, 41(9):1648-1661.