

王瑾,岳治国,贺文彬,等.2020.西安地区积层混合云的 $Z-R$ 关系研究[J].暴雨灾害,39(4):409-417

WANG Jin, YUE Zhiguo, HE Wenbin, et al. 2020. Research on the $Z-R$ relationship of mixed convective-stratiform clouds in Xi'an area [J].
Torrential Rain and Disasters, 39(4):409-417

西安地区积层混合云的 $Z-R$ 关系研究

王瑾^{1,2}, 岳治国¹, 贺文彬³, 戴昌明⁴, 潘留杰⁴, 刘慧⁴, 张镭²

(1. 陕西省人工影响天气中心, 西安 710016; 2. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000;

3. 陕西省气象局, 西安 710016; 4. 陕西省气象台, 西安 710016)

摘要:根据2013—2014年5—10月西安地区观测得到的雨滴谱数据,结合C波段新一代多普勒天气雷达的观测资料,对西安地区43次积层混合云降水的平均雨滴谱分布、微物理特征量及雷达反射率因子 Z 和雨强 R 的关系进行统计分析。结果表明:积层混合云降水的平均雨滴谱呈单峰型, Gamma分布对降水大粒子的拟合明显优于M-P分布;积层混合云中雨滴数浓度最大值及对雨强贡献最大值均出现在雨滴直径小于1 mm的范围内;利用最小二乘法建立了西安地区积层混合云的 $Z-R$ 关系 $Z=168R^{1.43}$;当雨滴谱数据计算的回波强度小于(大于)30 dBz,雷达对回波强度有明显高估(低估)现象,针对此现象提出了积层混合云雷达回波的5档修正方案;利用 $Z=168R^{1.43}$ 估算西安积层混合云降水个例的降雨量更接近实测降雨量,估算降雨量的相对误差从51.3%减小到25.4%。

关键词:雨滴谱;激光雨滴谱仪;积层混合云; $Z-R$ 关系

中图分类号:P412.25

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.04.011

Research on the $Z-R$ relationship of mixed convective-stratiform clouds in Xi'an area

WANG Jin^{1,2}, YUE Zhiguo¹, HE Wenbin³, DAI Changming⁴, PAN Liujie⁴, LIU Hui⁴, ZHANG Lei²

(1. Center of Weather Modification of Shaanxi Province, Xi'an 710016; 2. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University 730000;

3. Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an 710016; 4. Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710016)

Abstract: Based on the raindrop spectrum data observed in Xi'an, Shaanxi Province from 2013 to 2014, and combined with the observation data of the weather radar, the mean raindrop distribution, the microphysical characteristic quantity and $Z-R$ relationship of 43 precipitation events of the mixed convective-stratiform clouds were statistically analyzed. The results show that the mean raindrop spectrum of the precipitation display a single peak, and the fitting of the Gamma distribution to the large precipitation particles is obviously better than that of the M-P distribution. The drop size corresponding to the peak value of raindrop number concentration and having the greatest contribution to rainfall intensity appeared at less than 1 mm in diameter in the raindrop spectrum. A $Z-R$ relationship $Z=168R^{1.43}$ has been established by the least square method for the mixed convective-stratiform clouds in Xi'an area. When the echo intensity calculated from raindrop spectrum data is less than (greater than) 30 dBz, the radar observation can overestimate the echo intensity. With echo intensity decreasing, the radar echo intensity is obviously overestimated (underestimated). A 5-grade revised scheme for the radar echo is proposed. The $Z-R$ relationship $Z=168R^{1.43}$ was used to estimate the rainfall during the precipitation events of the mixed convective-stratiform clouds in Xi'an area. The estimated amount of precipitation is closer to the actually measured rainfall. The relative error of the estimated rainfall was reduced from 51.3% to 25.4%.

Key words: raindrop; parsivel; mixed convective-stratiform clouds; $Z-R$ relationship

引言

积层混合云是我国北方的主要降水云系,其降水效率高、降水持续时间长,可有效缓解干旱。因此,研

究积层混合云的降水特征,对工农业生产及防灾减灾具有重要意义。

雨量站可以实现单点雨量的连续观测,测量精度较高,但由于地面降水量分布不均匀及雨量站分布稀

收稿日期:2019-02-20;定稿日期:2019-10-18

资助项目:国家重点研发计划(2016YFA0601704);国家重大科研仪器研制项目(41627807);西北区域人影科学试验研究项目(RYSY201905; RYSY201909);陕西省重点研发计划项目(2020SF-429)

第一作者:王瑾,主要从事人工影响天气方面研究。E-mail: jin277217847@126.com

通信作者:张镭,主要从事大气物理与大气环境研究。E-mail: zhanglei@lzu.edu.cn

疏,使用地面雨量站的雨强 R 和雨量很难准确地计算出一定区域上的雨量。与雨量站相比,雷达反射率因子 Z 作为定量测量区域降水的工具,能实时探测云和降水结构及系统发生、发展演变情况,能迅速提供一定区域内大面积的定量实时降水估计。国内外对雷达定量测量降水开展了大量研究,其中 $Z-R$ 关系在估测降水方面的应用较为广泛。雷达反射因子 Z 为单位体积内所有粒子直径的6次方之和,雨强 R 与单位面积上雨滴直径的3次方成正比, Z 和 R 都与雨滴直径有关。因此,大量的雨滴直径统计结果对建立可靠的 $Z-R$ 关系至关重要。

Marshall 和 Palmer (1948)建立了典型降水过程的 $Z-R$ 经验关系 $Z=200R^{1.6}$;Rosenfeld 和 Ulbrich (2003)讨论了在不同下垫面(海洋和陆地)降水的 $Z-R$ 关系;何宽科等(2007)结合2004—2005年舟山雷达资料和雨滴谱资料拟合出适合舟山台风降水的 $Z-R$ 关系;濮江平等(2012)建立了南京对流性降水过程的 $Z-R$ 关系;冯雷和陈宝君(2009)确定了沈阳、哈尔滨等地不同降水过程的 $Z-R$ 关系;刘红燕等(2008)分析了2004年北京45次降水过程的 $Z-R$ 关系;庄薇等(2013)建立了适合青藏高原地区降水的气候 $Z-R$ 关系。这些研究结果表明, $Z-R$ 关系随地区、季节及降水类型(层状云、对流云、积层混合云)的变化会有所差异(Smith et al., 1993; Steiner et al., 1999; Chumchean et al., 2003; Seed et al., 2010)。为了消除或减小雷达估测降水的误差,可根据降水成因对降水分类以减少雨滴谱的谱型变化,从而缩小 $Z-R$ 关系中系数的变化范围。通过对层状云(Tokay and Short, 1996; Nzeukou et al., 2004)、对流云(王建初和汤达章, 1981; Tokay and Short, 1996; Atlas and Williams, 2003; Nzeukou et al., 2004; 濮江平等, 2012; 赵城城等, 2014)和积层混合云(刘红燕等, 2008; 晋立军等, 2012)降水的 $Z-R$ 关系分类统计,研究发现同一地点统计的 $Z-R$ 关系能代表当地同一降水类型的降水情况。然而,业务运行的雷达观测软件中 $Z-R$ 关系的系数一般为一组固定值,研究适合本地降水类型的 $Z-R$ 关系对提高雷达估测降水的精度显得十分重要。

准确测量的雨滴谱是确定适当 $Z-R$ 关系的关键。传统的滤纸色斑方法测量精度低、工作量大且实时性差。随着光电技术的发展,激光雨滴谱仪得到广泛应用,实现了雨滴谱测量的自动化。激光雨滴谱仪采用光电转换原理,可快速准确测量雨滴直径和下落速度,实时性较强。研究表明(濮江平等, 2007; Thurai et al., 2011; 胡子浩等, 2014; 张扬等, 2016; 岳治国和梁谷, 2018)激光雨滴谱仪的测量结果准确可靠。本文利用激光雨滴谱仪观测的西安地区积层混合云降

水雨滴谱资料,统计了2013—2014年共43次积层混合云降水概况(包括降水时段、总降雨量和样本数),计算了平均雨滴谱分布和微物理参量平均值特征,建立了适于该地区积层混合云降水的 $Z-R$ 关系,并对新建立的 $Z-R$ 关系进行评估。西安地区积层混合云的 $Z-R$ 关系的建立,为今后改进西安地区天气雷达对积层混合云降水的定量估计,降水精细化预报,人工增雨作业及其效果检验等奠定了基础。

1 资料与方法

1.1 观测资料与仪器

本研究使用了2013—2014年5—10月连续观测的雨滴谱数据、自动气象站分钟雨量数据和雷达观测资料。布设在陕西省西安市长安区气象局(108.88°E, 34.08°N, 海拔高度445 m)的激光雨滴谱仪和翻斗式自动雨量计分别提供雨滴谱数据和自动气象站分钟雨量数据,布设在陕西省西安泾河站(108.97°E, 34.43°N, 海拔高度410 m)的新一代多普勒天气雷达(CINRAD-CB)提供雷达观测资料。长安区气象局和泾河站直线距离41 km,海拔高度相差35 m。

采用德国OTT公司生产的激光雨滴谱仪(Parsivel)对雨滴谱进行测量,Parsivel是采用激光遥测技术对降水过程进行分析、记录的全自动监测设备,可对各种降水过程进行精确测量。Parsivel的激光发射器发射一束3 cm×18 cm的水平光束,激光接收器可将检测到的光束转换为电信号。当激光束里没有降水粒子降落穿过时,接收器的输出电压为最大电压。当降水粒子穿过水平光束时以其相应的直径遮挡部分光束,导致接收器输出电压变化,可通过电压的大小来确定降水粒子的直径大小,降水粒子的下降速度则可根据电子信号持续时间计算。降水雨滴谱仪通过统计降水粒子在速度和粒径上的分布计算各种降雨类型的强度、总量,还可给出降水过程中雷达反射率因子等。Parsivel对降雨过程进行观测时,数据记录周期为1 min,其具体参数见表1。

表1 Parsivel 主要性能指标

Table 1 Main specifications of Parsivel.

项目	详细说明
工作原理	激光二极管,波长780 nm,峰值功耗2 mW
采样面积	54 cm ²
粒径范围	0.062 ~ 24.500 mm (32档)
速度范围	0.050 ~ 20.800 m·s ⁻¹ (32档)
雨强范围	0.001 mm·h ⁻¹ ~ 1 200 mm·h ⁻¹
雨量精度	±5%(液态降水)/ ±20%(固态降水)

翻斗式自动雨量计的测量分辨率为0.1 mm,当计量翻斗承受的降雨量为0.1 mm时,翻斗翻转时就输出

一个脉冲信号,采集器自动采集存储0.1 mm降雨量。自动雨量计的数据记录周期与Parsivel相同,主要用来对Parsivel计算的降雨量进行检验。

CINRAD-CB是C波段新一代多普勒天气雷达,雷达采用21体扫模式进行体扫,在低层每个仰角上扫描两次,共11个仰角扫描,完成一次体扫用时为6 min。根据雷达反射率因子的平面位置显示(反射率因子PPI)和反射率因子垂直剖面可判断雷达回波是否为积层混合云降水。

1.2 数据处理

为研究积层混合云成雨过程、云中动力学及微物理学之间的相互关系,需要了解降水过程中的雨滴谱分布。

雨滴数浓度(N ;单位: m^{-3})的计算公式为

$$N(D_i) = \sum \frac{n_{ij}}{A \cdot \Delta t \cdot V_j \cdot \Delta D_i} \quad (1)$$

式中, n_{ij} 代表尺度第*i*档,速度第*j*档的雨滴数, A 和 Δt 分别代表采样面积和采样时间, D_i 代表第*i*档的雨滴直径, ΔD_i 代表对应的直径间隔, V_j 代表第*j*档的雨滴的下落末速度, $N(D_i)$ 代表直径 D_i 至 $D_i + \Delta D_i$ 的雨滴数浓度。

单位体积中,直径在 D_i 至 $D_i + \Delta D_i$ 的雨滴数浓度 $N(D_i)$ 与平均直径 $D_i + \frac{1}{2}\Delta D_i$ 的关系,称作雨滴数浓度分布,即雨滴谱分布。大量观测结果表明,雨滴谱分布一般遵从负指数分布。常用的是Marshall和Palmer(1948)雨滴谱分布公式,即M-P分布

$$N(D) = N_0 e^{-\lambda D} \quad (2)$$

式中 N_0 和 λ 分别为谱参数。

M-P分布在小滴和大滴区域对雨滴谱的拟合效果不是很好。提出用Gamma分布(Ulbrich, 1981)来拟合雨滴谱

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\lambda D} \quad (3)$$

式中 N_0 和 λ 分别为谱参数,Gamma分布中引入了形状因子 μ 。

雨滴谱分布是降水物理学中的重要参数,通过雨滴谱分布可计算雨强 R 、含水量 Q 、有效半径 R_e 、雷达反射率因子 Z 等参数,数学表达式如下

$$R = \frac{\pi}{6} \sum N(D_i) D_i^3 V(D_i) \quad (4)$$

$$Q = \frac{\pi \rho}{6} \sum N(D_i) D_i^3 \quad (5)$$

$$Z = \sum N(D_i) D_i^6 \quad (6)$$

$$R_e = \frac{\sum N(D_i) D_i^3}{2 \sum N(D_i) D_i^2} \quad (7)$$

其中: $N(D_i)$ 是直径为 D_i 的雨滴的空间数浓度, $V(D_i)$

是直径为 D_i 的雨滴的下落末速度。

为利用雷达回波估测降水,Marshall和Palmer(1948)建立了 $Z-R$ 的数学统计关系并指出适合的 $Z-R$ 关系对雷达定量测量降水精度的提高至关重要。 $Z-R$ 关系是在对雨滴谱分布形式做了某种假设条件下得到的,通常采用的经验公式如下

$$Z = AR^b \quad (8)$$

其中, Z 为雷达反射率因子, R 为雨强, A 和 b 为 $Z-R$ 关系的系数。

1.3 降水个例的选取及其概况

根据雷达资料对2013—2014年5—10月的积层混合云降水过程进行筛选,对符合积层混合云降水回波特征的降水过程的雨滴谱资料、自动站分钟雨量及雷达资料进行整理,统计出43次积层混合云降水过程,雨滴谱数据样本共23 910份,表2给出了43次降水过程概况及每次降水过程时段内雨滴谱数据样本个数。

1.4 Parsivel雨量数据检验

将自动站观测的降雨量作为真值,对Parsivel计算得到的降雨量进行检验,取每5 min雨量进行对比(见表3)。对43次降水过程分别计算平均值、标准差、均方根误差和相关系数,通过对比发现,43次过程中Parsivel计算的降雨量平均值和自动站观测的降雨量平均值范围均为0.06~0.20 mm,其中有26次降水过程的降雨量平均值相同,只有1次过程两者的平均值相差0.02 mm。Parsivel降雨量标准差的范围为0.04~0.26,而自动站观测的降雨量标准差的范围为0.06~0.30,这表明自动站测得的降雨量的离散程度大于Parsivel计算的降雨量。有95%的降水过程,Parsivel和自动站的降雨量的均方根误差不大于0.05,说明Parsivel计算的降雨量与自动站测得的降雨量有很好的一致性。有2次降水过程的相关系数小于0.8,相关系数在0.8~0.9之间的有8次过程,相关系数大于0.9的过程有33个,占总降水过程的77%。总体而言,Parsivel计算得到的降雨量与自动站观测的降雨量的一致性较好。

1.5 雷达回波资料提取

由于Parsivel的采样时间比较短,为60 s,而雷达体扫一周需要6 min,为了保证两者在时间上的一致性,将雨滴谱数据按照6 min进行平均。

雨滴谱资料为点资料,可以代表该站单点的降水情况,而雷达得到的是面数据,在比较雷达观测到的回波强度 Z_{rad} 与Parsivel计算的回波强度 Z_{par} 时,应考虑点资料和面资料的空间对应。泾河站海拔高度比长安区气象局高35 m,0.5°和1.5°仰角雷达波束轴线高度与长安Parsivel的垂直距离分别为378 m和1 086 m,因

表2 2013—2014年43次积层混合云降水概况

Table 2 Survey of raindrop spectrum data of 43 precipitation events from 2013 to 2014.

序号	降水日期 年/月/日	降水时段 (北京时)	总降 雨量 /mm	样本 数	序号	降水日期 年/月/日	降水时段 (北京时)	总降 雨量 /mm	样本 数
1	2013/5/5	16:52—17:53	0.99	62	23	2014/6/13	09:43—13:54	7.07	252
2	2013/5/17	09:01—22:45	14.31	825	24	2014/6/19	07:54—13:07	5.38	314
3	2013/5/24	05:24—10:25	2.67	302	25	2014/6/24—6/25	24日 19:15—25日 00:50	3.61	336
4	2013/5/25	05:13—17:00	31.05	708	26	2014/6/28—6/29	28日 17:16—29日 02:26	3.78	551
5	2013/6/8—6/9	8日 17:45—9日 18:08	54.31	1 464	27	2014/7/3	04:29—06:23	2.84	115
6	2013/7/2	08:55—14:22	12.43	328	28	2014/ 7/10	12:51—20:21	6.24	451
7	2013/7/4	09:00—17:47	13.33	528	29	2014/ 8/7	11:24—15:19	8.17	236
8	2013/7/17—7/18	17日 10:03—18日 12:51	24.15	1 543	30	2014/ 8/8	13:18—16:57	5.58	220
9	2013/7/22	08:38—15:56	12.5	439	31	2014/8/30	09:20—21:39	32.76	740
10	2013/8/8	02:12—07:58	4.78	347	32	2014/9/1	02:39—13:39	18.58	661
11	2013/8/28	10:39—15:16	6.7	278	33	2014/9/7	03:52—14:35	15.87	644
12	2013/9/4	01:18—04:39	1.08	202	34	2014/9/8—9/9	8日 15:56—9日 17:46	61.43	1 551
13	2013/9/8	05:51—09:02	2.07	192	35	2014/ 9/10	03:14—21:55	29.55	1 123
14	2013/9/19	02:31—07:21	9.15	291	36	2014/ 9/11	16:17—23:57	27.07	461
15	2013/9/23	00:05—10:44	3.69	640	37	2014/9/13	12:22—18:47	6.66	386
16	2013/10/14	08:48—14:35	9.23	348	38	2014/9/14	09:07—17:47	19.39	521
17	2013/10/16	01:09—12:12	7.17	664	39	2014/9/15	01:44—21:50	19.81	1 207
18	2013/10/30—10/31	30日 12:26—31日 03:49	10.28	924	40	2014/9/23	10:03—12:21	3.71	139
19	2014/5/10	01:03—20:04	39.62	1 142	41	2014/9/27	13:42—19:49	3.82	368
20	2014/5/13	09:14—15:39	4.64	386	42	2014/10/1	02:25—08:50	8.1	386
21	2014/5/19	02:21—06:17	1.74	237	43	2014/10/20	09:54—16:60	7.49	427
22	2014/5/23—5/24	23日 08:06—24日 00:10	20.1	965					

表3 Parsivel和自动站的降雨量统计量对比

Table 3 Statistical results of precipitation biases by Parsivel and automatic weather station.

序号	平均值/mm		标准差		均方根 误差	相关 系数	序号	平均值/mm		标准差		均方根 误差	相关 系数
	Parsivel	自动站	Parsivel	自动站				Parsivel	自动站	Parsivel	自动站		
1	0.08	0.08	0.04	0.06	0.05	0.57	23	0.09	0.10	0.12	0.14	0.05	0.95
2	0.09	0.09	0.05	0.07	0.05	0.75	24	0.08	0.09	0.12	0.14	0.05	0.94
3	0.07	0.08	0.06	0.07	0.04	0.80	25	0.08	0.08	0.12	0.14	0.04	0.95
4	0.19	0.20	0.18	0.20	0.05	0.97	26	0.08	0.08	0.12	0.13	0.04	0.94
5	0.19	0.20	0.26	0.30	0.07	0.98	27	0.08	0.09	0.12	0.13	0.05	0.94
6	0.12	0.12	0.10	0.11	0.04	0.93	28	0.09	0.09	0.12	0.13	0.05	0.94
7	0.14	0.14	0.12	0.13	0.04	0.95	29	0.10	0.10	0.13	0.15	0.05	0.95
8	0.08	0.08	0.10	0.12	0.05	0.93	30	0.09	0.10	0.12	0.14	0.05	0.95
9	0.09	0.10	0.13	0.14	0.05	0.95	31	0.16	0.18	0.21	0.24	0.06	0.97
10	0.07	0.08	0.10	0.12	0.04	0.93	32	0.12	0.13	0.20	0.22	0.05	0.97
11	0.09	0.09	0.11	0.12	0.05	0.93	33	0.11	0.11	0.13	0.15	0.05	0.94
12	0.07	0.07	0.10	0.11	0.04	0.92	34	0.20	0.20	0.19	0.21	0.05	0.98
13	0.07	0.08	0.10	0.11	0.05	0.92	35	0.12	0.13	0.19	0.20	0.04	0.98
14	0.09	0.10	0.10	0.12	0.05	0.93	36	0.13	0.13	0.22	0.22	0.04	0.98
15	0.06	0.06	0.09	0.10	0.04	0.90	37	0.06	0.06	0.07	0.08	0.04	0.87
16	0.08	0.09	0.13	0.15	0.05	0.95	38	0.10	0.10	0.13	0.13	0.04	0.95
17	0.07	0.07	0.09	0.10	0.04	0.90	39	0.08	0.09	0.08	0.09	0.05	0.86
18	0.08	0.08	0.08	0.10	0.05	0.89	40	0.09	0.09	0.09	0.10	0.05	0.88
19	0.16	0.16	0.15	0.16	0.05	0.95	41	0.07	0.07	0.07	0.08	0.05	0.84
20	0.15	0.15	0.15	0.16	0.05	0.96	42	0.09	0.09	0.08	0.09	0.05	0.84
21	0.14	0.14	0.15	0.17	0.05	0.96	43	0.08	0.08	0.07	0.08	0.05	0.83
22	0.10	0.11	0.14	0.16	0.05	0.96							

此选取0.5°和1.5°雷达仰角观测到的回波强度进行点对点,多点空间平均等4种对应方式,对 Z_{rad} 和 Z_{par} 的相关系数(见表4)进行对比分析。根据表4中的结果,选

择0.5度仰角,对水平方向进行9点平均的对应方式可以降低雷达面资料与Parsivel点资料由于水平位置平移造成的误差。

表4 雨滴谱反射率因子与雷达反射率因子的相关系数

Table 4 The correlation coefficient between Parsivel raindrop estimated and radar observed reflectivity.

不同仰角	对应方式	相关系数	质量控制后的样本数
0.5°仰角	点对点	0.60	3 689
1.5°仰角	点对点	0.37	2 885
0.5°仰角	水平9点平均	0.60	4 179
1.5°仰角	水平9点平均	0.40	3 364

2 雨滴谱特征及微物理特征分析

2.1 平均雨滴谱分布及微物理特征

利用M-P分布和Gamma分布对43次积层混合云降水的平均雨滴谱分布进行拟合,得到了相应的拟合参数(图1)。从图1中可看出,积层混合云降水平均雨滴谱曲线变化比较平缓,为单峰型。测量的平均雨滴谱谱宽范围为0.31~4.75 mm,数浓度最大值为46 m⁻³,出现在直径0.44 mm处。

使用M-P分布和Gamma分布分别拟合积层混合云雨滴谱时得到相应的谱参数。M-P分布的谱参数 $N_0=111, \lambda=2.11$; Gamma分布的谱参数 $N_0=1\ 027, \lambda=4.07, \mu=1.62$, Gamma分布曲线向下弯曲。M-P分布对雨滴谱拟合的平均相对误差为269%,在雨滴直径在0.31~1.63 mm之间拟合较好,平均相对误差为19%,直径大于1.63 mm拟合较差,平均相对误差为581%。

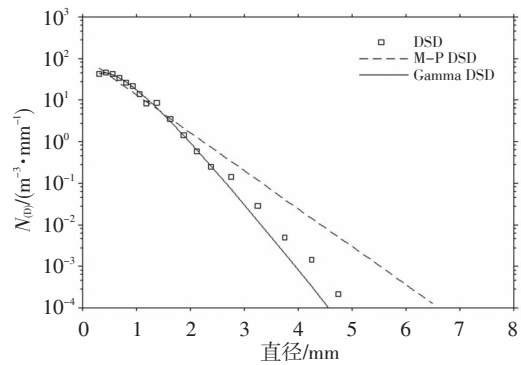


图1 43次降水实测平均雨滴谱分布及M-P分布和Gama分布拟合情况,其中方框为实测谱分布(DSD),虚线为M-P谱分布(M-P DSD),实线为Gamma谱分布(Gamma DSD)

Fig. 1 Observed mean raindrop spectrum distribution and M-P and Gamma distribution fitting for 43 precipitation processes, The box shows the observed mean drop size distribution (DSD), the dashed line M-P drop size distribution (M-P DSD) and the solid line Gamma drop size distribution (Gamma DSD)

Gamma分布对实测雨滴谱拟合的平均相对误差为24%,直径在0.31~2.38 mm之间, Gamma分布对小粒子拟合很好,平均相对误差仅为9%,直径大于2.38 mm, Gamma分布拟合的平均相对误差为63%。对于存在大粒子的积层混合云, Gamma分布能更好的体现大滴增多导致的实际曲线的弯曲情况。

为了讨论降水的物理特征,利用雨滴谱资料分别计算了微物理特征量。表5给出了43次积层混合云

表5 2013—2014年43次积层混合云降水微物理参量平均值

Table 5 Average values of microphysical parameters of the 43 precipitation events from 2013 to 2014.

序号	数浓度 /m ⁻³	雨强 /(mm·h ⁻¹)	含水量 /(g·m ⁻³)	雷达反射率因子 /(mm ⁶ ·m ⁻³)	序号	数浓度 /m ⁻³	雨强 /(mm·h ⁻¹)	含水量 /(g·m ⁻³)	雷达反射率因子 /(mm ⁶ ·m ⁻³)
1	125	0.86	0.24	162	23	137	1.69	0.47	522.9
2	410	0.94	0.26	68.3	24	188	1.05	0.29	113.6
3	100	1.07	0.30	70.5	25	261	0.80	0.22	44.5
4	391	2.84	0.79	390.6	26	86	0.80	0.22	56.1
5	454	2.43	0.68	210.7	27	195	1.51	0.42	368.5
6	160	2.28	0.43	301.5	28	252	0.85	0.24	65.5
7	365	1.57	0.44	119	29	457	0.94	0.26	23
8	158	1.09	0.30	103.7	30	396	0.74	0.15	21.8
9	183	1.92	0.53	193.4	31	365	2.65	0.74	334.6
10	114	0.93	0.26	69	32	192	1.71	0.48	123.1
11	194	1.02	0.28	66.3	33	659	1.81	0.50	84.4
12	38	0.30	0.08	29.6	34	611	2.47	0.69	188.5
14	229	2.06	0.57	419.8	35	203	1.87	0.52	87.5
13	92	0.68	0.19	74	36	318	0.82	0.23	46.6
15	477	0.43	0.12	28.4	37	461	1.09	0.30	66.9
16	402	1.66	0.46	136.9	38	478	1.44	0.40	47
17	131	0.54	0.15	36.5	39	498	1.65	0.50	56
18	120	0.39	0.11	20.5	40	253	1.64	0.45	196.5
19	396	1.94	0.54	213.8	41	1 083	1.24	0.34	35.5
20	81	0.80	0.22	120	42	196	1.26	0.35	210
21	103	0.73	0.20	50.5	43	738	0.89	0.25	26.4
22	265	1.66	0.46	105.6					

降水过程的微物理参量的平均值,其中第41次降水过程中雨滴平均数浓度出现最大值,为 $1\ 083\ \text{m}^{-3}$,而平均雨强和平均含水量在第4次降水过程最大,分别为 $2.84\ \text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $0.79\ \text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;第12次降水过程出现雨滴平均数浓度最小值,为 $38\ \text{m}^{-3}$ 。

2.2 各档雨滴直径对雨强的贡献

图2为2013—2014年43次积层混合云降水中各档直径雨滴对总雨滴数浓度和雨强的贡献。将雨滴分为直径 $0\sim 1\ \text{mm}$ 、 $1\sim 2\ \text{mm}$ 、 $2\sim 3\ \text{mm}$ 和 $3\ \text{mm}$ 以上4个档。 $0\sim 1\ \text{mm}$ 降水粒子数占总降水数浓度的87%,对雨强的贡献率为71%, $1\sim 2\ \text{mm}$ 降水粒子数占总降水数浓度的13%,对雨强的贡献率为26%, $2\ \text{mm}$ 以上降水粒子数占总降水数浓度的1%,对雨强的贡献率为3%。直径小于 $1\ \text{mm}$ 的雨滴对浓度的贡献最大,对雨强的贡献最大。 $2\ \text{mm}$ 以上的雨滴占总数浓度的比例虽只有13%,但对雨强的贡献却占到29%,可见大滴虽然所占比重很小,但大滴的尺度大,对雨强的贡献不能忽视。在山东、江苏、辽宁等地区研究结果(濮江平等,2012;周黎明等,2014;房彬等,2016)中也表明积层混合云中大雨滴对雨强的贡献较大。

2.3 雨强和各参量的关系

对43次积层混合云降水过程中的雨强、数浓度、含水量等物理量的变化进行分析,在双对数坐标上给出了43次降水过程所有数浓度和含水量的分钟值随

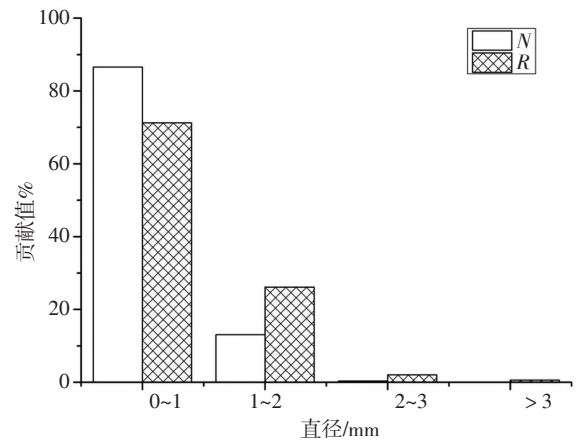


图2 43次降水过程各档直径雨滴对总数浓度N和雨强R的贡献

Fig.2 Contribution to the total raindrop number and precipitation intensity of raindrops with different sizes derived from the 43 precipitation events.

分钟雨强的变化(图3),可以看到含水量与雨强呈线性相关,李景鑫等(2010)对雷州半岛的积层混合云降水研究也有相同的结果,这说明不同地区的积层混合云的性质相似,雨强越大则含水量越大。积层混合云由对流云和层状云组成,因此积层混合云的雨强量级范围较大,从 10^{-2} ~ 10^2 ,积云降水强度高,对总降雨量的贡献也较大(洪延超等,1987)。雨滴数浓度量级为 $10\sim 10^4\ \text{m}^{-3}$,宫福久等(1997)发现层状云和积云混合云雨滴数浓度的量级分别为 $10^2\ \text{m}^{-3}$ 和 $10^3\ \text{m}^{-3}$ 。

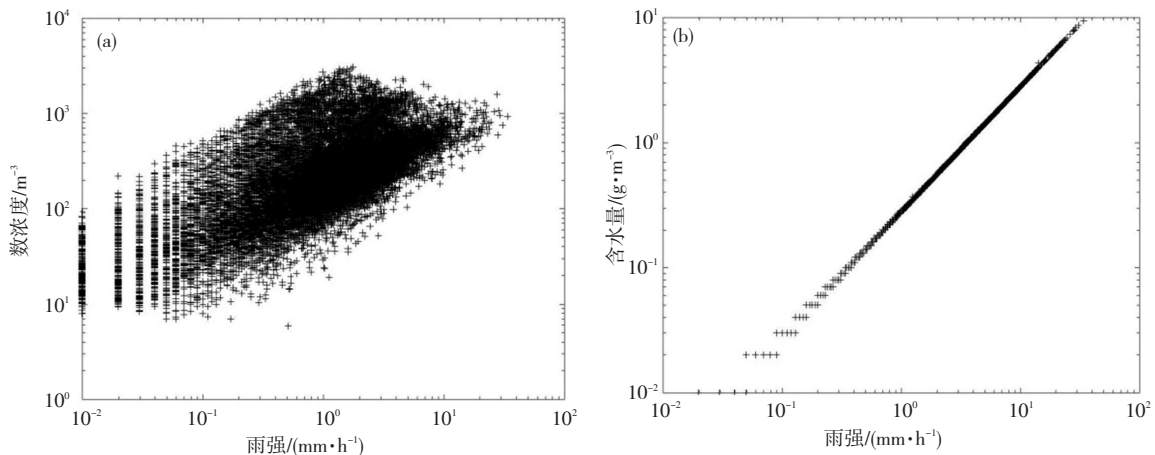


图3 不同物理参量数浓度(a)、含水量(b)随雨强的变化关系

Fig.3 Variations of physical parameters (a) number concentration, (b) water content with rain intensity.

图4为计算得到的43次降水过程雨滴有效半径及最大直径分钟值与分钟雨强的关系,有效半径 R_e 的范围是 $0.18\sim 1.37\ \text{mm}$,最大直径在 $0.56\sim 6.5\ \text{mm}$ 范围变化,雨强随雨滴有效半径和最大直径的增大均呈增强趋势,雨强最大值达到 $33.98\ \text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,降水强度大于 $15\ \text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 较强的区域主要集中在雨滴有效半径 $0.6\sim 1\ \text{mm}$,最大直径 $3.5\sim 6\ \text{mm}$ 范围内,这也反映出大粒径的雨滴对雨强的贡献不容忽视。

2.4 Z-R关系

新一代天气雷达的降水系列算法中WSR-88D的Z-R关系采用的是美国夏季深对流云降水统计得到 $Z=300R^{1.4}$,本研究致力于得到适应西安地区积层混合云降水的Z-R关系,并应用该关系改进西安雷达估测积层混合云降水的精度。图5是通过最小二乘法拟合43次积层混合云降水过程中Z和R的分钟值得到的Z-R关系 $Z=168R^{1.43}$ 。

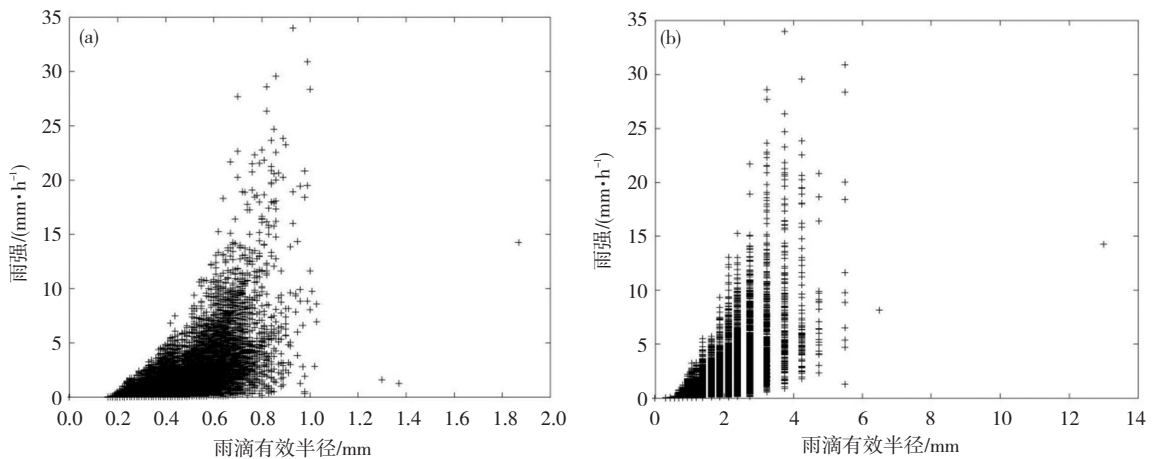


图4 雨滴有效半径(a),最大直径(b)与雨强的关系

Fig.4 The correlation between rainfall intensity and (a) effective radius and (b) maximum diameter of raindrops.

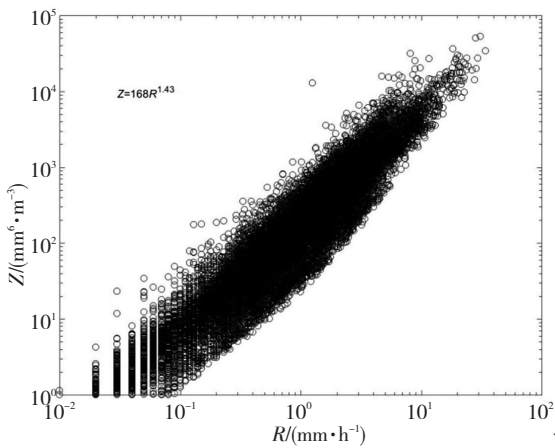


图5 Z-R关系

Fig.5 The relationship between Z and R

Atlas等(1999)统计了不同降水过程Z-R关系系数A和b的关系,发现A和b成反相关。Maki等(2001)指出,在b值相同时,A值越大表示雨滴尺度越大。此次研究中,关注5—10月每个月份中积层混合云降水过程的A和b的变化,表6给出了5—10月中的A和b值,7,9和10三个月份的b值均为1.37,其中7月A值最大,为207,9月A值最小,为125。

结合表6和图6可以看出,较大的A值对应较小的数浓度,也就是说7月份的积层混合云中雨滴尺度较大,数浓度较小,9月份雨滴尺度较小,而数浓度较大。由表6和图7可知,7月和9月的b值相当,且雨强相当。综上所述,7月的积层混合云降水以雨滴尺度较大,数浓度较小的对流性降水为主,9月以雨滴尺度较小,而数浓度较大的层状云降水为主。

2.5 雷达估测降水修正方案

对43次降雨过程中0.5°仰角的雷达观测回波强度 Z_{rad} 和Parsivel计算的回波强度 Z_{par} 的比较, Z_{par} 与 Z_{rad} 的相关性较好,相关系数为0.6(见表4)。将所有点按照 Z_{par} 的大小分为5档,<10 dBz、10~20 dBz、20~30 dBz、

表6 不同月份的积层混合云降水的A和b值

Table 6 A and b of precipitation processes in different months.

月份	A	b
5	183	1.45
6	195	1.42
7	207	1.37
8	151	1.53
9	125	1.37
10	183	1.37

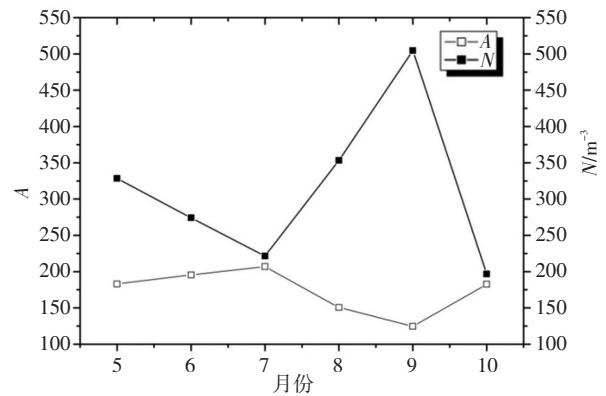


图6 A和N的月变化

Fig.6 Monthly variation of A and N.

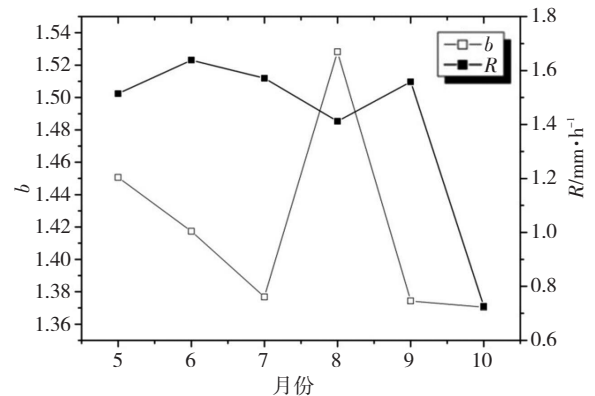


图7 b和R的月变化

Fig.7 Monthly variation of b and R.

30~40 dBz、≥40 dBz。由表7可知,随着 Z_{par} 的增大,

5 档的差值平均值分别为 -14.2、-6.2、-0.9、5.9、20.6 dBz, 其中当 $20 \text{ dBz} \leq Z_{\text{par}} < 30 \text{ dBz}$ 时, 差值平均值最小, 样本数为 1 522 个, 占总样本数的 36%; 当 $10 \text{ dBz} \leq Z_{\text{par}} < 20 \text{ dBz}$ 时, Z_{par} 平均值比 Z_{rad} 小 6 dBz, 样本数有 1 550 个, 占 37%。经过分析可知, $Z_{\text{par}} < 30 \text{ dBz}$ 时, 雷达有高估回波强度的情况, 当 $Z_{\text{par}} \geq 30 \text{ dBz}$ 时, 雷达有低估回波强度的情况。

表 7 Z_{rad} 和 Z_{par} 差异统计

Table 7 Statistics of the difference between doppler weather radar observed and Parsivel estimated echo intensities.

Z_{par} /dBz	$Z_{\text{par}} - Z_{\text{rad}}$ 平均值 /dBz	样本数 /个	占总样本数 /%
$Z_{\text{par}} < 10$	-14.2	844	20
$10 \leq Z_{\text{par}} < 20$	-6.2	1 550	37
$20 \leq Z_{\text{par}} < 30$	-0.9	1 522	36
$30 \leq Z_{\text{par}} < 40$	5.9	249	6
$Z_{\text{par}} \geq 40$	20.6	14	1

2.6 雷达估测降水个例

2013 年 7 月 2 日降水过程是一次积层混合云降水过程, 降水过程从早上 8:55 开始持续到 14:22 结束。图 8 是 2013 年 7 月 2 日 08:55—14:22 微物理量随时间的变化图, 此次过程中总降雨量 12.43 mm, 平均雨滴数浓度为 160 m^{-3} , 平均含水量 $0.43 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均雨强 $2.28 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 最大雨强达 $5.61 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

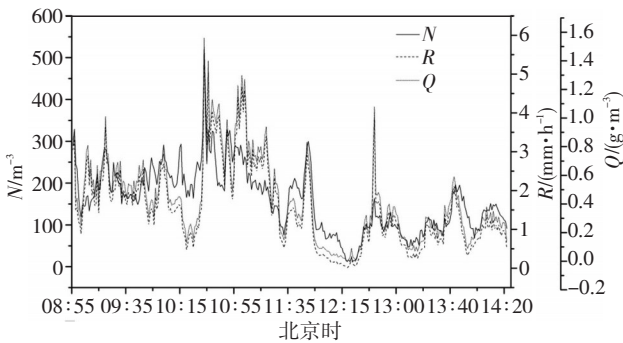


图 8 2013 年 7 月 2 日 08:55—14:22 微物理量随时间的变化

Fig.8 Changes of microphysical parameters of raindrops from 08:55 to 14:22 in July 2, 2013.

图 9 是 2013 年 7 月 2 日降水过程中 Z_{par} 与 Z_{rad} 的对比分析。从图中可以看到, Z_{par} 与 Z_{rad} 随时间的变化有较好的一致性, 两者的相关系数为 0.65。当 $20 \text{ dBz} \leq Z_{\text{par}} < 30 \text{ dBz}$ 时, 二者的一致性较好, 当 $Z_{\text{par}} < 30 \text{ dBz}$, Z_{par} 低于 Z_{rad} , 表明雷达有高估回波强度的现象, 而当 $Z_{\text{par}} \geq 30 \text{ dBz}$ 时, Z_{par} 高于 Z_{rad} , 表明雷达存在低估回波强度的情况。由于 Z_{par} 变化范围较大, 且 Z_{par} 在不同范围时雷达高估和低估回波强度的情况不一, 因此对雷达回波修正时参考表 7 中雷达反射率因子和雨滴谱反射率因子的强度差异分 5 档对积层混合云降水回波进行修正, 当 $Z_{\text{par}} < 10 \text{ dBz}$, Z_{rad} 减小 7 dBz, 当 $10 \text{ dBz} \leq Z_{\text{par}} <$

20 dBz , Z_{rad} 减小 3 dBz, 当 $20 \text{ dBz} \leq Z_{\text{par}} < 30 \text{ dBz}$, Z_{rad} 不变, 当 $30 \text{ dBz} \leq Z_{\text{par}} < 40 \text{ dBz}$ 时, Z_{rad} 增加 3 dBz, 当 $Z_{\text{par}} \geq 40 \text{ dBz}$, Z_{rad} 增加 10 dBz。

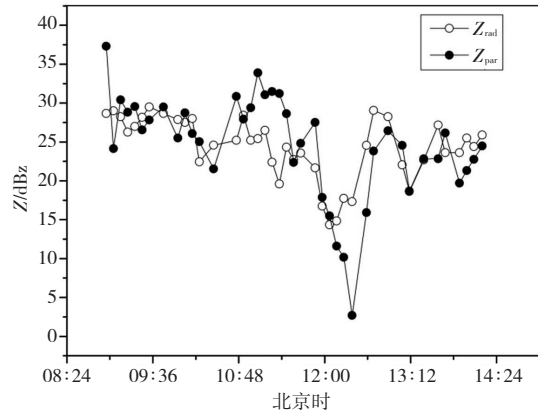


图 9 2013 年 7 月 2 日 08:55—14:22 Z_{par} 和 Z_{rad} 对比分析

Fig.9 Comparison between Z_{par} and Z_{rad} for the period from 08:55 to 14:22 in July 2, 2013.

在新一代天气雷达预测降水时, 通常是依据经验公式 $Z=300R^{1.4}$ 得到降雨量, 但对于不同地区不同降水云系, 雷达对降水强度的低估或高估会对降雨量预测带来较大的误差, 对雷达回波的修正是非常必要的。对于此次降水过程, 根据统计的结果 $Z=168R^{1.43}$ 对雷达实测回波 Z_{rad} 进行校正, 再对 Z_{rad} 进行校正后计算降雨量, 并与 Parsivel 观测的降雨量进行比较, 比较结果见表 8。由表 8 可以看出, 此次过程 Parsivel 降雨量为 12.43 mm, 而根据经验公式 $Z=300R^{1.4}$ 得到的过程降雨量只有 6.05 mm(相对误差 51.3%), 利用统计公式 $Z=168R^{1.43}$ 得到的降雨量为 9.27 mm(相对误差 25.4%), 对雷达实测回波修正后, 降雨量为 10.05 mm, 修正回波估测得到的降雨量最为接近 Parsivel 观测的降雨量, 因此, 对不同地区不同降水云系等 $Z-R$ 关系的统计以及雷达回波修正对雷达估测降水的本地化是十分必要的, 可以有效提高雷达估算降水的准确性。

表 8 Parsivel 测得的降雨量与 $Z-R$ 公式估计的降雨量差异

Table 8 Difference between Parsivel measured and $Z-R$ estimated precipitation.

Parsivel 观测降雨量	$Z=300R^{1.4}$		$Z=168R^{1.43}$	
	不修正回波	修正回波	不修正回波	修正回波
12.43 mm	6.05 mm	10.05 mm	9.27 mm	10.05 mm

3 结论

本文利用 2013—2014 年 5—10 月西安地区的观测资料对积层混合云降水的微物理特征进行分析, 并且得出了西安本地化的 $Z-R$ 关系, 最后对雷达估测的降雨量进行本地化应用。主要结论如下:

(1) 对 43 次积层混合云降水的平均雨滴谱分布拟

合发现,平均雨滴谱分布呈单峰型,谱宽范围为0.31~4.75 mm。无论是M-P分布和Gamma分布都对小粒子的拟合较好,Gamma分布对于大粒子的拟合明显优于M-P分布。积层混合云雨滴数浓度最大值及对雨强的贡献最大值均出现在直径小于1 mm范围内。

(2) 通过最小二乘法对所有的积层混合云降水建立了Z-R关系 $Z=168R^{1.43}$;对不同月份的雷达参数A和b分析中发现5—10月的A和b成反相关,且相关关系为 $A=10^{2.33}b^{-0.65}$,研究发现7月和9月b值相同,雨滴数浓度相当,较大(小)A值对应较大(小)的雨滴尺度,表明7月份的积层混合云降水中对流性降水占主导,9月份则是层状云降水占主导。

(3) 通过对比 Z_{rad} 和 Z_{par} 发现,当 Z_{par} 小于30 dBz时,雷达对回波强度明显高估,当 Z_{par} 大于30 dBz时,雷达对回波强度有低估现象,此次研究针对积层混合云的 Z_{rad} 提出了5档修正方案。

(4) 利用雷达经验公式 $Z=300R^{1.4}$ 和新建立的积层混合云关系式 $Z=168R^{1.43}$ 分别估测2013年7月2日积层混合云降水过程的降雨量,与 $Z=300R^{1.4}$ 估测的降雨量(6.05 mm,相对误差51.3%)相比, $Z=168R^{1.43}$ 估测的降雨量(9.27 mm,相对误差25.4%)更接近实测降雨量(12.43 mm),利用5档修正方案对雷达回波修正后估算的降雨量有小幅增加。结果表明,采用适于积层混合云的Z-R关系对于提高雷达估算降水的准确性非常有必要。

参考文献:

房彬,郭学良,肖辉.2016.辽宁地区不同降水云系雨滴谱参数及其特征量研究[J].大气科学,40(6):1154-1164

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

宫福久,刘吉成,李子华.1997.三类降水云雨滴谱特征研究[J].大气科学,21(5):607-614

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

洪延超,黄美元,吴玉霞.1987.梅雨锋云系中尺度系统回波结构及其与暴雨的关系[J].气象学报,45(1):56-64

胡子浩,濮江平,张欢,等.2014. Parsivel激光雨滴谱仪观测较强降水的可行性分析和建议[J].气象科学,34(1):25-31

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

李景鑫,牛生杰,王式功,等.2010.积层混合云降水雨滴谱特征分析[J].兰州大学学报(自然科学版),46(3):56-61

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

濮江平,赵国强,蔡定军,等.2007. Parsivel激光降水粒子谱仪及其在气象领域的应用[J].气象与环境科学,30(2):3-8

濮江平,张昊,周晓,等.2012.对流性降水雨滴谱特征及其与雷达反射率

因子的对比分析[J].气象科学,32(3):253-259

王建初,汤达章.1981.不同雨型的Z-I关系及几种误差讨论[J].大气科学学报,4(2):185-191

岳治国,梁谷.2018.陕西渭北一次降雹过程的粒子谱特征分析[J].高原气象,37(6):1716-1724

庄薇,刘黎平,王改利,等.2013.青藏高原复杂地形区雷达估测降水方法研究[J].高原气象,32(5):1224-1235

周黎明,王俊,龚佃利,等.2014.山东三类降水云雨滴谱分布特征的观测研究[J].大气科学学报,37(2):216-222

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

赵城城,杨洪平,刘晓阳,等.2014.大雨滴对雷达定量测量降水的影响研究[J].暴雨灾害,33(2):106-111

Atlas D, Ulbrich C W, Marks J F D, et al. 1999. Systematic variation of drop size and radar-rainfall relations [J]. Journal of Geophysical Research, 104(D6):6155-6169

Atlas D, Williams C R. 2003. The Anatomy of a Continental Tropical Convective Storm [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 60(1):3-15

Chumchean S, Sharma A, Seed A. 2003. Radar rainfall error variance and its impact on radar rainfall calibration [J]. Physics & Chemistry of the Earth, 28(1):27-39

Maki M, Keenan T D, Sasaki Y, et al. 2001. Characteristics of the Raindrop Size Distribution in Tropical Continental Squall Lines Observed in Darwin, Australia [J]. Journal of Applied Meteorology, 40(8):1393-1412

Marshall J S, Palmer W M K.1948. The Distribution of Raindrops with Size [J]. Journal of Meteorology, 5(4):165-166

Nzeukou A, Sauvageot H, Ochou A D, et al. 2004. Raindrop Size Distribution and Radar Parameters at Cape Verde [J]. Journal of Applied Meteorology, 43(1):90-105

Rosenfeld D, Ulbrich C W. 2003. Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities [M]. Radar and Atmospheric Science: A Collection of Essays in Honor of David Atlas. Boston: MA: 237-258

Seed A W, Nicol J, Austin G L, et al. 2010. The impact of radar and rain-gauge sampling errors when calibrating a weather radar [J]. Meteorological Applications, 3(1):43-52

Smith J A, Krajewski W F. 1993. A modeling study of rainfall rate-reflectivity relationships [J]. Water Resources Research, 29(8):2505-2514

Steiner M, Smith J A, Burges S J, et al. 1999. Effect of bias adjustment and rain gage data quality control on radar rainfall estimation [J]. Water Resources Research, 35(8):2487-2504

Thurai M, Petersen W A, Tokay A, et al. 2011. Drop size distribution comparisons between Parsivel and 2-D video disdrometers [J]. Adv Geo Sci, 30(1):3-9

Tokay A, Short D A. 1996. Evidence from Tropical Raindrop Spectra of the Origin of Rain from Stratiform versus Convective Clouds [J]. Journal of Applied Meteorology, 35(3):355-371

Ulbrich C W. 1981. Effect of size distribution variations on precipitation parameters determined by dual-measurement techniques[C]//Conference on Radar Meteorology. Boston: MA:276-281