2016年2月

Journal of the Meteorological Sciences

Feb., 2016

杨俊梅,陈宝君,韩永翔,等.山西省不同地区雨滴谱的统计特征.气象科学,2016,36(1):88-95.

YANG Junmei, CHEN Baojun, HAN Yongxiang, et al. Statistical characteristics of raindrop size distribution in different regions of Shanxi. Journal of the Meteorological Sciences, 2016, 36(1):88-95. doi:10.3969/2014jms.0107

山西省不同地区雨滴谱的统计特征

杨俊梅1,2 陈宝君3 韩永翔1 李培仁2

(1 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室,南京 210044; 2 山西省人工降雨防雹办公室,太原 030002; 3 南京大学 大气科学学院,南京 210023)

摘要 利用 2010—2012 年 OTT Parsivel 激光降水粒子谱仪在山西省 6 个地区观测的雨滴谱资料,调查了不同地区对流性和层状性降水滴谱特征。结果表明:对两类降水而言,山区降水强度大于平原地区,且山区降水广义截距参数 N_w 和质量加权平均直径 D_m 均大于平原地区。两种地形层状性和对流性降水的雨滴平均谱分布均呈明显单峰型,两种降水的峰值直径分别为 0.56 mm 和 0.94 mm,对流性降水雨滴谱明显比层状谱宽。Gamma 分布较好的拟合了平均谱,统计了对流性降水 Gamma 分布参数 μ - λ 关系。此外,对 N_w - R_v D_m -R 以及 Z-R 关系也进行了研究。

关键词 降水;雨滴谱;μ-λ 关系; *Z*-*R* 关系;山西 分类号: P426.6 **doi**:10.3969/2014jms.0107 **文献标识码**: A

Statistical characteristics of raindrop size distribution in different regions of Shanxi

YANG Junmei^{1,2} CHEN Baojun³ HAN Yongxiang¹ LI Peiren²

(1 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration,

Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

(2 Weather Modification Office of Shanxi Province, Taiyuan 030002, China)

(3 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract By using the raindrop size distribution data of six regions in Shanxi province from the OTT Parsivel laser precipitation particle spectrometer from 2010 to 2012, the characteristics of convective and stratiform raindrop size distribution in different areas are studied. Results show that the rainfall intensity, the generalized intercept parameter (N_w) and mass-weighted mean diameter (D_m) of raindrops in mountainous area are much greater than those in flat area. The raindrop size distribution of these two types of precipitation shows obvious unimodal distribution and their peak diameters are 0.94 mm and 0.56 mm. The Gamma distribution is fit better for average spectra. The shape (μ) -slope (λ) relationship of the Gamma distribution is also derived for convective rain. Besides, *Z-R*, N_w -*R* and D_m -R relationships are also analyzed.

Key words Precipitation; Raindrop size distribution; μ - λ relationship; Z-R relationship; Shanxi

收稿日期(Received):2014-06-17;修改稿日期(Revised):2014-10-31; 网络出版日期(Published on-line):2016-01-18 网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1243.P.20160118.1547.002.html

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41175118);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306040, GYHY201306065)

通信作者(Corresponding author): 韩永翔(HAN Yongxiang).han-yx66@126.com

引 言

降水是影响全球气候变化的重要因素之一,降 水量的时空分布与气象、气候、水文、生态、农业及其 他相关学科的研究密不可分。决定降水的因素包括 大中尺度的宏观天气条件和小尺度的微观过程。雨 滴谱是微物理过程中的重要部分,其分布可以表明 液态含水量,雷达回波强度,降水强度等参数。

国内外学者对微物理过程,尤其是雨滴谱早有 研究,其观测遍布全球,并取得很多重要成果。 Bringi, et al^[1]研究表明雨滴谱特征与降水类型、大 气条件、地理位置及气候格局有关,海洋性气团和大 陆性气团引起降水的雨滴谱特征有明显不同。国内 对雨滴谱的观测由 1960s 传统的滤纸色斑法发展到 激光观测。近年来,许多学者对雨滴谱仪观测方法 和数据处理进行了研究^[2-5]。学者们通过对我国各 地雨滴谱谱型、峰值、影响谱型因子等问题的研究, 表明在不同降水类型下(如层状云降水、对流云降 水、积层混合云降水、梅雨锋暴雨等),雨滴谱分布 特征不同。积雨云降水雨滴谱较宽,层状云降水雨 滴谱较窄,混合云降水谱宽介于前两者之间,并提出 相应的 Z-R 关系^[69]。针对不同类型降水的拟合分 布,研究发现,积雨云和积层混合云降水雨滴谱谱宽 大于层状云,两种降水在大水滴和特小水滴端都偏 多,这是由于大滴的碰并与破碎造成的^[10,11]。M-P 分布和 Gamma 分布两种拟合方法都适用于层状云 降水,对流云降水雨滴谱拟合时 Gamma 拟合效果优 于 M-P 拟合^[12-15]。对连续性降水和雷暴降水两种 低能见度天气过程的雨滴谱特征研究表明,低能见 度阶段小粒子含量偏大,且这一时段各特征量均为 高值^[16]。因此,了解不同地区不同降水条件的雨滴 谱特征是十分有意义的。

山西 2008 年开始布设德国 OTT 公司生产的 Parsivel 雨滴谱仪,迄今为止已经获得了许多连续观 测资料,本文利用六个雨滴谱观测点 2010—2012 年 的资料进行统计分析,对比不同地区不同降水云系 下雨滴的微物理特征。

1 仪器与观测概况

1.1 Parsivel 粒子谱仪及数据处理

Parsivel激光粒子谱测量仪是以激光为基础的 高级光学粒子测量仪器,通过测量降水中所有液态 和固态粒子对激光强度的衰减程度和通过时间来计 算降水粒子的尺度和速度,测量系统包括发射器、接 收器、控制和运算、存储等部分组成,其核心仪器为 能产生54 cm²水平光束的光学传感器。激光降水 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,测量粒子尺度范围为0.2~ 25 mm,速度范围为0.2~20 m·s⁻¹,最后将数据存储 为32×32 的矩阵格式。数据观测在给定的速度和 尺度值上进行,前两档(0.062 和0.187mm)由于信 噪比过低而不能使用,因此观测到粒子的最小尺度 由第三档开始,即0.312 mm。

由于观测中对雨滴进行了球形近似,而实际雨 滴在下落过程中可能发生形变,因此首先需要对观 测数据进行订正处理。本文采用 Battaglia, et al^[17] 方法,对雨滴进行形变修正的公式如下:

$$D_{q} = \begin{cases} D_{par} & (D_{par} \leq 1.00 \text{ mm}) \\ (1.075 - 0.075D_{par})D_{par} \\ (1.00 \text{ mm} < D_{par} \leq 5.00 \text{ mm}) \\ 0.7D_{par} & (D_{par} > 5.00 \text{ mm}) \end{cases}$$
(1)

其中: D_q 代表修正后的雨滴等效球形直径; D_{par} 代表 Parsivel 测得的雨滴直径。

已有研究表明,Gamma 分布较 M-P 分布更有普适性,尤其对对流性降水云的拟合效果更为理想^[12],因此本文利用 Gamma 分布进行谱拟合。Gamma 分布函数^[19]为:

$$N(D) = N_0 D^{\mu} \exp(-\lambda D) \quad , \tag{2}$$

其中: N_0 是截距参数(m⁻³·mm^{-µ-1}), μ 是形状因子, λ 是斜率参数(mm⁻¹)。这里采用阶矩法对 Gamma 分布参数进行拟合。目前,阶矩法估计谱分布参数 被广泛应用于雨滴谱的研究^[19-21],其优点在于各阶 矩量与雨滴谱参数有一定的对应关系,如含水量与 3 阶矩成比例,雷达反射率因子与6 阶矩成比例等。 利用阶矩法,Gamma 分布中的三个参数(N_0,μ,λ) 可以用雨滴谱观测值的 2、4、6 阶矩来估算^[19,20]。 对于雨滴谱的 Gamma 分布,第 n 阶矩定义为:

$$M_{n} = \int_{0}^{\infty} D^{n} N(D) d(D) = N_{0} \frac{\Gamma(\mu + n + 1)}{\Lambda^{\mu + n + 1}} , \quad (3)$$

其中: $\Gamma(x)$ 为完整的 Gamma 函数。利用这一方法, 质量加权平均直径 $D_{m}(mm)$ 可表示为:

$$D_{\rm m} = \frac{M_4}{M_3} \quad , \tag{4}$$

广义截距参数^[1] N_w (mm⁻¹·m⁻³)表示为:

$$N_{\rm w} = \frac{4^4}{\pi \rho_{\rm w}} (\frac{10^3 W}{D_{\rm m}^4}) \quad , \tag{5}$$

其中 $\rho_{w}(1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3})$ 为水的密度, W 为雨水含量。

1.2 观测概况

6部 Parsivel 雨滴谱仪分别布置在山西省汾阳、 介休、离石、方山、祁县、太谷,其中方山和离石观测 点海拔高度分别为1251m和1067m,为山区地 形;汾阳、介休、祁县、太谷观测点海拔高度分别为 763m、749m、763m、790m,为平原地形。现有观 测,采样时间均取60s。为得到更可靠的降水雨滴 谱资料,将雨强小于0.1mm·h⁻¹和雨滴数少于10 个的样本剔除。此外,对降水持续时间少于30min 的数据也剔除,这样共得到92876个1min的有效 样本。各地雨滴谱样本数如表1所示。

表1 雨滴谱样本概况

Та	ble	e 1		The	general	features	of	raindrop	spectrum	samples	
----	-----	-----	--	-----	---------	----------	----	----------	----------	---------	--

	数据范围	雨滴谱 样本总数 (1min)	层状性降水 样本数	对流性降水 样本数
汾阳	2010年4—9月 2011年5—10月 2012年5—9月	15 313	9 337(70.0%)	767(5.0%)
方山	2011 年 5—10 月 2012 年 4—9 月	12 281	7 855(64.0%)	1 063(8.7%)
太谷	2010年4—10月 2011年4—10月 2012年5—9月	26 072	14 604(56.0%)	1 085(4.2%)
介休	2010年5—9月 2011年5月 2012年5—9月	11 566	7 385(63.9%)	568(4.9%)
祁县	2010年4—9月 2011年5—10月 2012年5—10月	19 313	11 473(59.4%)	1 216(6.3%)
离石	2011 年 5—9 月 2012 年 5—10 月	8 331	5 540(66.5%)	485(5.8%)
总计		92 876	56 194(60.5%)	5 184(5.6%)

1.3 降水类型分类

本研究中区分降水类型是以雨滴谱观测数据为 基础。采用 Bringi, et al^[1]和 CHEN, et al^[21]分类方 法对于样本的任意时刻 t_i ,其雨强为 $R(t_i)$,若 t_i - N_s 到 t_i + N_s 时段内雨强值大于 0.5mm·h⁻¹,并且标准差 小于 1.5mm·h⁻¹,则该样本为层状性降水;若 t_i - N_s 到 t_i + N_s 时段内雨强值大于 5 mm·h⁻¹,并且标准偏差 大于 1.5 mm·h⁻¹,则该样本为对流性降水,此处 N_s 代表 5 个样本。既不属于层状性降水又不属于对流 性降水的样本为混合性降水,本文对这类降水不加 以研究。各地层状性和对流性降水样本数如表 1 所 示。在平原地区,层状性和对流性降水在所有平原降水样 本中占 59.2%,对流性降水占 5.0%。山区层状性和 对流性降水样本数分别为 13 395 和 1 548, 层状性降水在所有降水中占 65.0%, 对流性降水为 7.5%。

图1给出了山区2个站所有降水和平原地区4 个站所有降水雨强分布频率及各等级对总降水量的 累积贡献。总体来看,各等级降水贡献都表现出山 区比平原大的特点,尤其降水较强的情况下。统计 表明,山区和平原层状性降水的平均雨强分别为 2.02 mm·h⁻¹和1.73 mm·h⁻¹,对流性降水的平均雨 强分别为13.00 mm·h⁻¹和10.62 mm·h⁻¹。可见,无 论是对流性还是层状性降水,山区降水强度均大于 平原地区。



 图 1 山区(黑色)和平原(红色)不同雨强降水的频率 分布(实线)及其对总降水量的累积贡献(虚线)
 Fig.1 Frequency distribution of rainfall intensity derived from the whole disdrometer datasets (solid line) and its accumulative contribution to the total rainfall(dashed line) of mountainous area(black line) and flat area(red line)

2 山西省降水的微物理特征

2.1 *D*_m和 *N*_w分布

首先对比雨滴谱总体特征。图2给出了6个观 测点两种类型降水的平均 log₁₀ N_w与 D_m的对应关 系,表2给出了山区和平原地区 log₁₀N_w与 D_m的平均 值和标准差。对流性降水雨滴数浓度和质量加权平 均直径都要比层状性降水大,反映了对流性降水的 雨水含量要比层云降水高,不过,对流性降水雨滴尺 度大也有可能是仪器只能测量 0.31mm 以上的雨 滴,而对流性降水过程中大量破碎造成的小雨滴无 法被仪器观测到而造成的。对同一类型的降水而 言,N_和D_在各地存在着一定差异。有意思的是, 即使都位于山区或者平原,不同观测点上的雨滴谱 特征也有差异。例如,方山和离石,无论是层状性还 是对流性降水,基本上都是方山的数浓度高但尺度 小,而离石正好相反,即雨滴数浓度低而雨滴尺度 大。再来看介休和太谷,也是如此,同类型降水情况 下,介休雨滴数浓度要比太谷高,但尺度要比太谷 小。由表2可知,山区 D_m的平均值与平原相差不 大,而 N_w大于平原,表明地形对雨滴数浓度的影响 大于特征直径。此外,山区 N_w和 D_m的标准差都要 比平原大,这反映了无论是山区还是平原,雨滴谱分 布都存在着一定的空间变率,并且山区降水变率大 于平原地区。



图 2 各观测点平均 $log_{10}N_w = D_m$ 的关系 Fig.2 The relation between average $log_{10}N_w$ and D_m at different observation point

表 2 山区和平原 D_m (单位:mm)与 $\log_{10}N_w$ 特征值

Table 2 The characteristic value of $\log_{10} N_{\rm w}$ and $D_{\rm m}$ in mountainous area and flat area

		全部降水	层状性	对流性
山区	平均值	1.16	1.18	1. 57
$D_{\rm m}/({\rm mm})$	标准差	0.32	0.27	0.31
山区	平均值	3. 59	3.63	3.88
${\rm log_{10}}N_{\rm w}$	标准差	0.46	0.42	0.30
平原	平均值	1.13	1.18	1.58
$D_{\rm m}/{\rm mm}$	标准差	0. 29	0.26	0. 28
平原	平均值	3. 50	3.56	3.80
${\rm log_{10}}N_{\rm w}$	标准差	0. 42	0.39	0. 28

2.2 $N_{\rm w}$ 、 $D_{\rm m}$ 与 R 的关系

为讨论雨滴数浓度和特征直径与降水强度的关 系,图 3、4 分别给出了 N_w -R、 D_m -R 的散点图,图中 a、c 分别为平原地区层状性和对流性降水,b、d 分别 对应山区层状性和对流性降水。对于所有的 N_w -R和 D_m -R 曲线,拟合的幂指数关系均为正,表明由于 雨滴的凝结破碎机制,在雨强较大时 N_w 和 D_m 值比 雨强较小时高。在 N_w -R 指数关系中,对流云系数 和指数均大于层状云,而 D_m -R 关系中两种类型降 水的系数和指数没有明显不同。对比 N_w -R 和 D_m -R的指数关系,表明对流性降水的 N_w 比 D_m 对于雨强 的敏感性更强,这一点在雨强较大时更为明显。由 于雨强较大时,雨滴谱达到了雨滴凝结破碎到达的 平衡态,此时雨强的增加仅会导致 N_w 的增大,因此 对流性降水的直径在 $R>40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 后趋于固定值 (2~3 mm)。

2.3 微物理特征参量

表3列出了山西省6个雨滴谱观测点降水微物 理特征参量平均值,其中N代表粒子数浓度,W代 表雨水含量,R代表雨强,D_m为质量加权平均直径, Z为雷达反射率因子。对比表中各特征值发现,方 山县降水数浓度明显高于其他观测点,离石对流性 降水数浓度较高,层状性降水与其他平原观测点相 差不大,可见地形对于对流性降水的影响高出层状 性降水。

表 3 各雨滴谱观测点的微物理特征参量 (all 为总降水,S 为层状性降水,C 为对流性降水) Table 3 Integral rain parameters derived from the composit

Table 5	integr	ai iai	n paramete	is derived	u nom me	composite	
raindrop	spectra	for o	convective	(C) and	stratiform	(S) rains	
	N .		W	7	R	D_{m}	-

	N	Lag N	W	R	$D_{\rm m}$	7
	(m^{-3})	Log ₁₀ /V _w	$(g\!\cdot\!m^{-3})$	$(\mathbf{mm} \cdot \mathbf{h}^{-1})$	(mm)	L
汾阳-S	219.8	3.53	0.10	1.66	1.20	27.10
汾阳-C	447.5	3.84	0.50	10.03	1.54	37.60
汾阳-all	210.3	3.49	0.10	1.72	1.15	22.96
方山-S	350.4	3.70	0.12	2.07	1.15	28.41
方山-C	643.1	3.93	0.59	12.42	1.52	38.41
方山-all	358.0	3.67	0.14	2.63	1.13	23.86
太谷-S	231.3	3.50	0.10	1.67	1.22	27.69
太谷-C	442.9	3.74	0.49	10.23	1.62	38.02
太谷-all	203.9	3.43	0.09	1.57	1.15	22. 24
介休-S	315.3	3.71	0.10	1.63	1.10	26.15
介休-C	474.1	3.84	0.55	11.50	1.57	38. 56
介休-all	50.6	3.65	0.10	1.80	1.05	21.82
祁县-S	248.3	3.57	0.10	1.90	1.19	27.75
祁县-C	483.7	3.80	0.43	10.92	1.56	35.72
祁县-all	233.2	3.50	0.10	2.04	1.15	22. 89
离石-S	232.8	3.54	0.11	1.95	1.23	28.34
离石-C	548.9	3.76	0.64	14.24	1.68	40. 20
离石-all	234.9	3.48	0.12	2.34	1.21	24.41

2.4 平均谱

图 5 显示了山区和平原雨滴平均谱分布特征及 Gamma 分布拟合结果,Gamma 的分布参数在表 4 中 列出。由图可知,两种类型降水雨滴平均谱分布均 呈单峰型,层状性降水雨滴最大直径为 3.85 mm,峰 值直径为 0.56 mm,对流性降水雨滴最大直径为 6.0 mm,峰值直径为 0.94 mm,两种降水平原与山



图 3 平原(左列)和山区(右列)不同云型下 N_w与 R 散点图(灰色曲线为幂指数拟合曲线)(a,b)层状云;(c,d)对流层 Fig.3 Scatter plots of N_m and R for convective and stratiform rain types in mountainous area and flat area (Gray curve is power exponent fitting curve)



图 4 平原(左列)和山区(右列)不同云型下 D_m与 R 散点图(灰色曲线为幂指数拟合曲线)(a,b)层状云;(c,d)对流层 Fig.4 Scatter plots of D_m and R for convective and stratiform rain types in mountainous area and flat area (Gray curve is power exponent fitting curve)

区均相同,对流性降水雨滴谱明显比层状谱宽。考察层状谱,我们发现在大滴一端(直径大于 3.2 mm),山区雨滴明显要比平原多,这可能反映了 有地形情况下层状性雨滴蒸发作用弱于平原,导致 大雨滴多。从拟合结果来看,Gamma 分布对层状性 降水拟合效果很好,对对流性降水中等以下雨滴谱的代表性也较好,但在大滴一端则存在一定偏差,说明 Gamma 分布也有一定的局限性。由表 4 可见,Gamma 分布的三个参数层状性降水均大于对流性,并且平原比山区参数大。

93



图 5 雨滴谱平均谱分布及 Gamma 分布拟合曲线(a)层状云;(b)对流层 Fig.5 The fitting curve of average raindrop spectra for convective and stratiform rain types and Gamma functions (grey line shows flat area; black line shows mountainous area)

表 4 Gamma 分布参数 Table 4 Parameter distribution of Gamma

降水类型	$N_0/({\rm mm^{-1-\mu}\cdot m^{-3}})$	μ	Λ
平原层状云	55 303	3.22	5.78
山区层状云	47 159	2.93	5.44
平原对流云	11 222	2.28	3.49
山区对流云	11 939	1.98	3.34

2.5 μ-λ 关系

大量研究表明, Gamma 分布具有普适性, 正是 由于形变因子 μ 的引入, 使其能够更准确的反应自 然云降水谱分布, 并且形变因子的大小对云和降水 的微物理特性有明显影响。然而, 许多学者在模式 研究中常将形变因子 μ 取作常数, 将另外两个因子 N_0 和 λ 作为变量处理。实际上, 在降水过程中 μ 和 λ 是变化的。ZHANG, et al^[20]分析佛罗里达地区的 数据提出, 雨强大于 5 mm·h⁻¹降水的 μ - λ 关系的经 验公式为:

 $\lambda = 0.0365\mu^2 + 0.735\mu + 1.935_{\circ} \quad (6)$

CHEN, et al^[21]研究表明, μ - λ 关系也存在地区 差异,这种差异一定程度上取决于 D_m 的大小。为了 调查山西省不同地区的 μ - λ 关系,这里针对对流性 降水做出统计。为了减小样本误差的影响,选取雨 滴数高于 1 000 且 R>5 mm·h⁻¹的对流性样本进行 拟合,得到了图 7 所示的 μ 和 λ 之间的二项式关系 及其表达式,(7)式为平原拟合结果,(8) 式为山区 拟合结果。

$$\lambda = 0.0154\mu^2 + 0.682\mu + 1.962 , \quad (7)$$

 $\lambda = 0.0162\mu^2 + 0.710\mu + 1.840 \quad (8)$

对比(7)和(8),我们发现山区和平原μ-λ关系 相差较小。与(6)对比,山西地区的二次项系数明 显低于 ZHANG, et al^[20]等的结果,对比图 6 的虚线 和拟合曲线发现,对于相同的 λ 值,佛罗里达曲线 (黑色虚线)中 μ 值低于拟合曲线(红色和黑色实 线),并且曲线之间的差距随着降水率的增大(λ 增 大)而增大,这主要是由于尺度参数如 D_m 的不同。 对于一个符合 Gamma 分布的雨滴谱, μ - λ 关系可表 示为 $\lambda D_m = 4 + \mu^{[18]}$ 。因此,在 $D_m 和 \mu$ 值一定的情况 下, λ 值能够估测,也就是说,当 λ 一定时, D_m 较大 则表明 μ 较大,因此本研究中 μ 值大于佛罗里达,表 明山西地区降水的 D_m 值大于佛罗里达地区。



图 6 平原和山区对流性降水的 μ - λ 关系 Fig.6 Scatter plots of μ - λ values for convective rain. The solid and dashed lines represent the fitting of the μ - λ relationship and the empirical μ - λ relationship from ZHANG et al., respectively. Black (red) line shows flat (mountainous) area

2.6 Z-R 关系

雨滴谱研究也能为雷达定量估测降水提供算法 支持,新一代天气雷达定量估测降水的公式为 Z= 300R^{1.4},但大量研究表明,在不同地区这一公式有 所不同^[7]。图 7 列出了两种地形条件下对流性和 层状性降水的 Z-R 关系式,平原和山区降水与传统 的表达式均有一定区别。对比发现,层状性降水表 达式中系数和指数都比较小,对流性降水的指数则



差别不大。此外,对比发现使用 $Z = 300R^{1.4}$ 会导致

降水被高估。

图 7 平原(左侧)和山区(右侧)不同类型下 Z-R 关系(a,b)层状云; (c,d)对流云 Fig.7 Scatter plots of Z-R relation for stratiform rain and convective rain in flat and mountainous areas

3 结论

本文利用 Pasivel 雨滴谱观测资料,分析了山西 省不同地区对流性和层状性降水的雨滴谱统计特 征。主要结论如下:

(1)对流性降水雨滴数浓度和质量加权平均直 径都比层状性降水大。各个雨强等级的降水贡献方 山和离石地区均大于其他地区,无论是对流性还是 层状性降水,方山和离石地区降水强度均较大。

(2)不同观测点上的雨滴谱特征也有差异,反 映了雨滴谱分布存在着一定的空间变率,并且山区 降水的变率大于平原地区。

(3) 对流性降水的 N_w比 D_m对雨强的敏感性更强,且在雨强较大时更为明显。

(4)两种类型降水雨滴谱均为单峰型,层状性和对流性降水的峰值直径分别为 0.56 mm 和 0.94 mm,且不受地形影响;

(5)Gamma 分布对层状性降水拟合效果很好, 但对对流性降水大滴一端的拟合存在一定偏差, Gamma 分布的三个参数表明层状性降水大于对流 性,平原大于山区。山区和平原μ-λ关系相差较小, 山西地区的二次项系数明显低于 Zhang 等^[20]美国 佛罗里达的值。λ 值相同时,佛罗里达曲线μ值低 于拟合曲线,表明山西降水的 D_m值大于佛罗里达地区。

(6)两种地形条件下对流性和层状性的 Z-R 关系,均与传统的表达式均有一定区别,层状性降水表达式中系数和指数都比较小,对比发现使用 Z = 300R^{1.4}会导致降水被高估。

值得说明的是,由于 Parsivel 雨滴谱仪对直径 小于 0.3 mm 以下的雨滴测量限制,因此,可能会高 估对流性降水的雨滴平均尺度,这一点需要以后利 用更高精度的雨滴谱仪加以证实。

参考文献

- [1] Bringi V N, Chandrasekar V, Hubbert J, et al. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dualpolarized radar analysis. J. Atmos. Sci., 2003, 60(2): 354-365.
- [2] 徐华英,李正洪.南岳一次阵性降水的演变特征//我国云雾 降水微物理特征的研究.北京:科学出版社,1965:41-48. XU Huaying, LI Zhenghong. The evolution characteristics of a gustiness precipitation of Nanyue Mountain//A study of the microphysical characteristics of cloud, fog and precipitation in China. Beijing: Science Press (in Chinese), 1965:41-48.
- [3] 杨加艳,肖辉,李培仁,等.雨滴轴比订正对雷达参量及其关系的影响研究. 气候与环境研究, 2012, 17(1): 29-36.
 YANG Jiayan, XIAO Hui, LI Peiren, et al. Influence of the rain-

drop axis ratio on radar parameters and their relationships. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2012, 17(1); 29-36.

- [4] 胡子浩, 濮江平, 张欢, 等. Parsivel 激光雨滴谱仪观测较强降水的可行性分析和建议. 气象科学, 2014, 34(1): 25-31.
 HU Zihao, PU Jiangping, ZHANG Huan, et al. Feasibility analyses and recommendations of Parsivel optical disdrometer in measurements of strong precipitation. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2014, 34(1): 25-31.
- [5] 王可法,张卉慧,张伟,等. Parsivel 激光雨滴谱仪观测降水中 异常数据的判别及处理. 气象科学, 2011, 31(6): 732-736.
 WANG Kefa, ZHANG Huihui, ZHANG Wei, et al. The detection and elimination of abnormal data for the precipitation observed by Parsivel precipitation particle spectrometer. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2011, 31(6): 732-736.
- [6] 林文,牛生杰.宁夏盛夏层状云降水雨滴谱特征分析. 气象科学, 2009, 29(1): 97-101.
 LIN Wen, NIU Shengjie. Characteristics of the surface raindrop size distribution of summer stratiformis precipitation in Ningxia

province. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 2009, 29 (1): 97-101.

- [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.
 FENG Lei, CHEN Baojun. The radar reflectivity-rainrate relationships as inferred from ground-based raindrop spectra observed by GBPP-100 probe. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese),2009,29(2):192-198.
- [8] 周黎明,王俊,龚佃利,等.山东三类降水云雨滴谱分布特征的观测研究.大气科学学报,2014,37(2):216-222.
 ZHOU Liming, WANG Jun, GONG Dianli, et al. A study on the distribution of raindrop size in three types of precipitation in Shandong province. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2014, 37(2): 216-222.
- [9] 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.
 CHEN Lei, CHEN Baojun, YANG Jun, et al. Characteristics of raindrop size distribution of rainstorm on Meiyu front during 2009-2010. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2013, 36(4): 481-488.
- [10] 宫福久,刘吉成,李子华. 三类降水云雨滴谱特征研究. 大气科学, 1997, 21(5): 607-614.
 GONG Fujiu, LIU Jicheng, LI Zihua. Study of the raindrop size distributions for three types of precipitation. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 1997, 21(5): 607-614.
- [11] 宫福久,李子华,陈宝君,等.一次北上台风降水微结构演变 特征. 气象科学,1997,17(4):335-343.
 GONG Fujiu, LI Zihua, CHEN Baojun, et al. Evolution of typhoon precipitation microstructure. Scientia Meteorologica Sinica

(in Chinese), 1997, 17(4): 335-343.

- [12] 陈宝君,李子华,刘吉成. 三类降水云雨滴谱分布模式. 气象 学报, 1998, 56(4): 506-512.
 CHEN Baojun, LI Zihua, LIU Jicheng. Model of raindrop size distribution in three types of precipitation. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1998, 56(4): 506-512.
- [13] 濮江平,张伟,姜爱军,等.利用激光降水粒子谱仪研究雨滴 谱分布特性. 气象科学, 2010, 30(5): 701-707.
 PU Jiangping, ZHANG Wei, JIANG Aijun, et al. Characteristics of gamma raindrop size distribution based on the precipitation particle spectrometer. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 2010, 30(5): 701-707.
- [14] 濮江平,张昊,周晓,等.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. 气象科学, 2012, 32(3): 253-259.
 PU Jiangping, ZHANG Hao, ZHOU Xiao, et al. Comparative analysis on rain spectrum characteristics of deep convective cloud and its radar reflectivity. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2012, 32(3): 253-259.
- [15] 胡子浩, 濮江平, 张欢,等. 庐山地区层状云和对流云降水特 征对比分析. 气象与环境科学, 2013, 36(4): 43-49.
 HU Zihao, PU Jiangping, ZHANG Huan, et al. Characteristics comparison analysis of stratiform cloud and convective cloud precipitation in Lushan. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 2013, 36(4): 43-49.
- [16] 聂颖,陈宝君,濮江平,等.南京机场降水低能见度雨滴谱特征. 气象科技, 2013, 41(1): 160-164.
 NIE Ying, CHEN Baojun, PU Jiangping, et al. Characteristics of raindrop size distribution in low-visibility rainy weather at Nanjing Airport. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2013, 41(1): 160-164.
- [17] Battaglia A, Rustemeier E, Tokay A, et al. Parsivel snow observations: A critical assessment. J. Atmos. Oceanic Technol., 2010, 27(2): 333-344.
- [18] Ulbrich C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution. J. Climate Appl. Meteor., 1983, 22(10): 1764-1775.
- [19] Ulbrich C W, Atlas D. Rainfall microphysics and radar properties: Analysis methods for drop size spectra. J. Appl. Meteor., 1998, 37 (9): 912-923.
- [20] ZHANG Guifu, Vivekanandan J, Brandes E A, et al. The shapeslope relation in observed gamma raindrop size distributions: Statistical error or useful information? J. Atmos. Oceanic Technol., 2003, 20(8): 1106-1119.
- [21] CHEN Baojun, YANG Jun, PU Jiangping. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in eastern China. J. Meteor. Soc. Jpn., 2013, 91(2): 215-227.