

文章编号: 2096-1618(2023)05-0548-08

# 广东龙门地区雨滴谱特征研究

王莹珏<sup>1</sup>, 彭思越<sup>1</sup>, 张浩然<sup>1</sup>, 郑佳锋<sup>1</sup>, 曾正茂<sup>2</sup>, 唐顺仙<sup>3</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 福建省气象信息中心, 福建 福州 350001; 3. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**为更好了解华南龙门地区的降水微物理特征,利用2019年4-9月的激光雨滴谱观测资料,研究了该地区不同雨强和不同类型降水的雨滴谱特征和差异,提出本地的雷达反射率因子与降水强度( $Z-R$ )关系和Gamma斜率参数与形状参数( $\Lambda-\mu$ )关系,并与国内外其他地区的结果进行对比。结果表明:随雨强增大,龙门地区的雨滴谱逐渐变宽、倾斜度逐渐变低。龙门地区以层云降水为主,但累积降水量则主要由对流降水贡献。龙门地区的 $Z-R$ 关系与传统关系较为吻合,雨滴谱的 $\Lambda$ 和 $\mu$ 参数很好符合二项式关系,且与美国佛罗里达观测的结果接近。与北京、那曲和江淮地区相比,龙门层云降水的平均广义截距参数 $N_w$ 最低,但平均直径 $D_m$ 最大;对流降水的平均 $N_w$ 大于那曲地区,但小于华北地区和江淮地区,平均 $D_m$ 小于那曲地区,但大于江淮地区。

**关键词:**大气物理学与大气环境;云降水物理;广东龙门;雨滴谱特征;层状云和对流云降水

**中图分类号:**P426.6

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2023.05.009

## 0 引言

雨滴谱是指单位体积、单位尺度间隔内的雨滴数浓度随粒径分布。雨滴谱反映了降水最基本的微观信息,雨滴谱观测和研究对深入了解降水物理过程和变化机制,提高雷达定量估测降水精度和优化数值模式参数化方案等具有重要意义。

近年来,国内外开展了大量的雨滴谱观测和研究,在雨滴谱测量方法和特征研究等方面都取得了许多成果。研究表明,不同地区的雨滴谱存在显著差异。Battan等<sup>[1]</sup>分析了世界69个不同地区的雨滴谱,并给出了相应的反射率因子 $Z$ 和雨强 $R$ 关系。Kumar等<sup>[2]</sup>研究了新加坡地区的雨滴谱斜率参数 $\Lambda$ 与形状参数 $\mu$ 的关系,发现该地区的 $\Lambda-\mu$ 关系接近于印度,而与美国佛罗里达州的观测结果差异较大。Wen等<sup>[3]</sup>对中国华东地区的雨滴谱进行统计,发现与亚洲其他地区的季风降水相比,该地区的雨滴浓度更高且直径更小。

雨滴谱特征与降水类型也密不可分<sup>[4]</sup>。Bringi等<sup>[5]</sup>对全球不同地区的雨滴谱按照粒径和截距参数分布,划分为层云降水雨滴谱和对流云降水雨滴谱;并将对流降水分为海洋性对流和陆地性对流两类。Zhang等<sup>[6]</sup>发现了 $\Lambda-\mu$ 关系会随着降水类型的不同而

发生变化,该现象在后续Chang等<sup>[7]</sup>的研究中也得到了证实。王洪等<sup>[8]</sup>对山东地区不同类型雨滴谱特征进行研究,发现层云降水的雨滴尺度较为集中,随高度变化较小;而对流云降水的雨滴尺度随高度变化较大,会对雷达定量反演降水造成明显影响。

雨滴谱也会因海拔高度和地形产生明显差异。李岩瑛等<sup>[9]</sup>对祁连山降水和地形关系进行了研究,发现小雨的天数和海拔高度呈线性相关,中雨及以上降水与地理位置和坡度存在一定关系。李慧等<sup>[10]</sup>发现黄山山腰的雨滴尺度相较于山顶和山地的更大。李山山等<sup>[11]</sup>发现随海拔升高,弱降水的雨滴总浓度也升高,但平均粒径减小;而中等及以上降水的雨滴总浓度则降低,但平均粒径增大。

广东省龙门县位于中国华南地区,属亚热带季风气候。该地区下垫面复杂,海气相互作用强烈,降水频数和强度均位于全国首位<sup>[12]</sup>。本文利用龙门县2019年4-9月的雨滴谱观测资料,对雨滴谱随雨强变化、不同类型雨滴谱特征和差异、 $Z-R$ 和 $\Lambda-\mu$ 关系等进行研究,旨在进一步认识该地区降水的微观特征,并为该地区雷达定量估计降水等业务提供一定参考。

## 1 数据和方法

### 1.1 Parsivel 2 激光雨滴谱仪及资料

本文使用的雨滴谱资料是由德国OTT公司研制的二代激光雨滴谱仪Parsivel 2观测得到。该雨滴谱仪以

收稿日期:2022-09-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41705008);四川省自然科学基金资助项目(2022NSFSC0209);大学生创新创业训练计划资助项目(202010621005)

通信作者:郑佳锋, E-mail: zjfl988@cuit.edu.cn

光电技术为基础,根据雨滴穿越激光光束时信号受到的衰减来计算雨滴的等效体积直径  $D$  (mm),并根据雨滴穿越激光束的时间来得到下落速度  $V_t$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。设备采样时间为60 s,采样面积为  $54 \text{ cm}^2$ 。观测的雨滴谱资料被分为32个非等间距的直径和速度通道存储,即每个雨滴谱样本共计1024个记录,可测量的直径范围为  $0.2 \sim 25 \text{ mm}$ ,速度范围为  $0.2 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

## 1.2 数据质量和质量控制

为减少 Parsivel 2 自身局限性和环境因素影响所造成的数据偏差,采用以下方法对原始观测资料进行质量控制:

(1) 考虑设备实际的信噪比,删除前两个直径通道的数据,即认为该设备实际能可靠观测的雨滴最小直径为  $0.312 \text{ mm}$  [13]。

(2) 在海平面大气压条件下,雨滴在沉降过程中直径超过  $8 \text{ mm}$  后会破碎并分解。因此数据记录中大于  $8 \text{ mm}$  的雨滴是多个粒子重叠的结果,故将这部分数据剔除。

(3) 考虑设备的灵敏度限制,将雨滴总数小于10或者雨强小于  $0.01 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的样本视为非降水样本,

予以剔除 [14]。

(4) 将数据中因“边界效应”和“风切变或溅射效应”产生的“粒径过小或速度过大”的雨滴也均视为非正常数据 [14]。判断方法是将实测结果与 Atlas 等 [15] 理论结果进行对比,如公式(1)~(2),若实测的雨滴直径-下落速度超出理论值  $\pm 60\%$ ,则予以删除。考虑到 Parsivel 2 对于小雨滴存在一定程度的低估,该方法应用于雨滴直径超过  $1 \text{ mm}$  的情况 [16]。

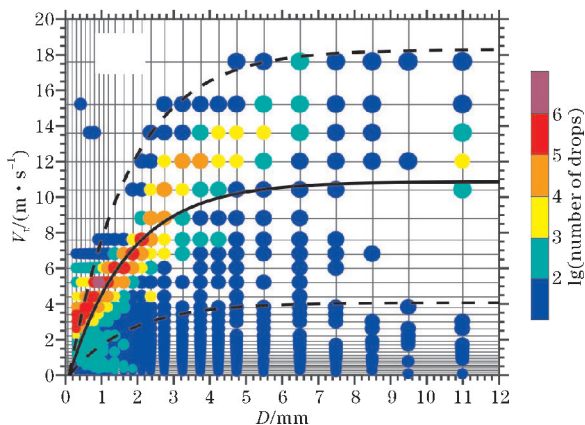
$$D = \frac{1}{0.6} \times \ln \frac{10.3}{9.65 - \frac{V_t}{\delta(h)}}$$

$$\delta(h) = 1 + 3.68 \times 10^{-5} h + 1.71 \times 10^{-9} h^2$$

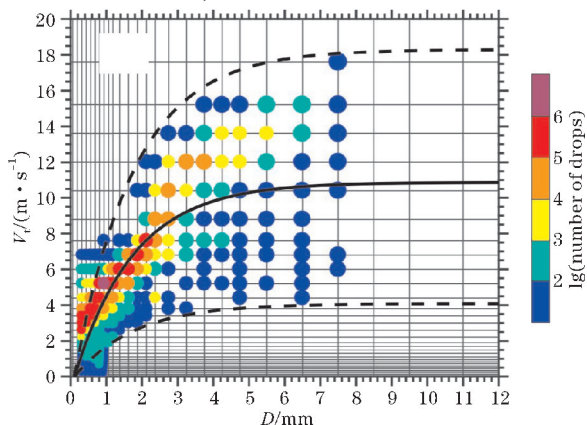
式中,  $\delta(h)$  和  $h$  分别为海拔订正系数和海拔高度 (m)。

(5) 最后,为进一步排除零散的非降水样本,将持续时间过短 (小于  $10 \text{ min}$ ) 的数据也剔除。

为表明上述质量控制的效果,统计了观测期间所有雨滴在不同  $D$  和  $V_t$  通道上的频次分布,结果如图1所示。可见,质量控制后,雨滴大部分  $D$ - $V_t$  分布在 Atlas 曲线附近,数据质量整体较可靠,共  $1.07\%$  的雨滴被判定为病态数据,予以删除。



(a) 质量控制前



(b) 质量控制后

图1 观测期间所有雨滴质量控制前后在不同直径  $D$  和下落速度  $V_t$  通道上的频次分布

(实线代表 Atlas 理论结果,上下虚线分别代表理论结果的  $\pm 60\%$  范围)

## 1.3 降水物理量和 Gamma 参数计算

质量控制后,将雨滴个数转化为雨滴数浓度:

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

式中,  $i$  和  $j$  分别为第  $i$  个直径通道和第  $j$  个速度通道,  $n_{ij}$  为雨滴个数,  $(D_i)$  ( $\text{m}^{-3}$ ) 为雨滴数浓度,  $\Delta D_i$  (mm) 为相邻两个直径通道的差值,  $A$  ( $\text{m}^2$ ) 为有效采样的面积,  $\Delta t$  (s) 为采样时间。进一步利用雨滴谱计算得到降水相关的6个物理量,包括:雨滴总数浓度  $N_T$  ( $\text{m}^{-3}$ )、降水强度  $R$  ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )、反射率因子  $Z$  ( $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ )、雨滴总含水量  $W$  ( $\text{g}^{-3}$ )、雨滴谱粒径大小  $D_m$  (mm) 和雨滴总数浓度  $N_w$  ( $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ ),公式如下:

$$N_T = \sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} \frac{n_{ij}}{A_i \cdot \Delta t \cdot V_j}$$

$$R = \frac{6\pi}{10^4} \sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} D_i^3 \frac{n_{ij}}{A_i \cdot \Delta t}$$

$$W = \frac{\pi \rho_w}{6000} \sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} D_i^3 \frac{n_{ij}}{A_i \cdot \Delta t \cdot V_j}$$

$$Z = \sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} D_i^6 \frac{n_{ij}}{A_i \cdot \Delta t \cdot V_j}$$

$$D_m = \frac{\sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^4 \Delta D_i}{\sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^3 \Delta D_i}$$

$$N_w = \frac{4^4}{\pi \rho_w} \left( \frac{10^3 W}{D_m^4} \right)$$

式中, $\rho_w(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ 为雨水密度。

雨滴谱的参数化对数值模式参数化方案优化等具有重要意义,本文采用 Ulbrich<sup>[17]</sup> 提出的 Gamma 模型对雨滴谱进行参数化:

$$N(D)=N_0D^\mu e^{-\Lambda D}$$

式中, $N_0(\text{m}^{-3}\cdot\text{mm}^{-1})$ 为浓度参数, $\mu$ 为形状参数, $\Lambda(\text{mm}^{-1})$ 为斜率参数。3个参数采用阶矩法估算,定义  $n$  阶矩为

$$M_n=\int_0^\infty N(D)D^ndD=\frac{N_0\Gamma(n+\mu+1)}{\Lambda^{n+\mu+1}}$$

其中  $\Gamma(x)$  为伽马函数。Cao 等<sup>[18]</sup> 对不同阶矩法进行评估后认为 2/3/4 阶矩效果较好,故本文采用 2/3/4 阶矩法对 Gamma 3 个参数进行计算,公式如下:

$$\mu=\frac{3M_4M_2-4M_3^2}{M_3^2-M_4M_2}$$
$$\Lambda=\frac{M_3(\mu+4)}{M_4}$$
$$N_0=\frac{M_2\Lambda^{\mu+3}}{\Gamma(\mu+3)}$$

2 不同雨强的雨滴谱特征

雨滴谱会随着降水强度的变化而体现出差异,本文将雨强分为 6 个区间<sup>[14]</sup>: $0.1\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}\leq R1<2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}\leq R2<5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}\leq R3<10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}\leq R4<20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}\leq R5<50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $R6\geq 50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。不同区间的雨滴谱累积样本数和累积降水量统计结果如图 2 所示。可见,龙门汛期的降水频次随雨强增大而减少,但累积降水量则随雨强增大而增大。 $R1$  的累积样本数占比最高,达到 48.57%,但累积降水量仅占 4.59%; $R2\sim R5$  的累积样本数占比依次为 16.92%、13.94%、9.09% 和 8.29%,累积降水量占比依次为 6.31%、11.44%、15.26% 和

30.14%;极端强降水  $R6$  的累积样本数仅占 3.18%,但可以贡献 32.26% 的降水量。

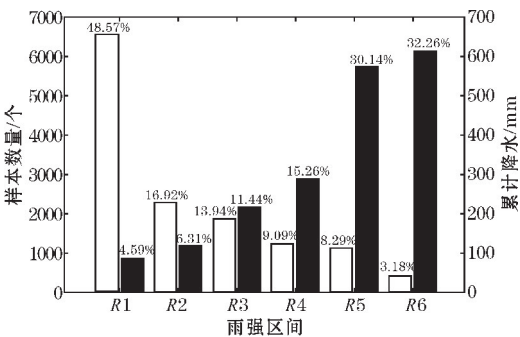


图2 不同雨强下的雨滴谱累积样本总数和累积雨量

进一步统计  $R1\sim R6$  的平均雨滴谱,结果如图 3 所示,表 1 给出了平均雨滴谱计算得到的降水物理量和 Gamma 参数。由图 3 可见,整体上不同雨强的雨滴数浓度均随着直径增大而减小,且呈单峰分布,雨滴数浓度最大的雨滴直径为 0.437 mm。随着雨强增大,所有直径的雨滴数浓度都增大, $R6$  的雨滴数浓度最大可达  $2804\text{ m}^{-3}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。对表 1 的结果进行对比可以发现,降水的  $Z$ 、 $W$ 、 $N_t$  和  $D_m$  也都随雨强增大而增大,但  $N_0$ 、 $\Lambda$  和  $\mu$  则都随雨强增大而减小,表明雨滴谱逐渐变宽、倾斜度变小。

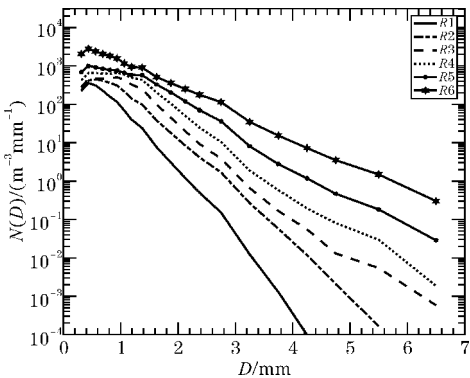


图3 6个雨强区间的平均雨滴谱

雨强	降水物理量和 Gamma 参数								
	$N_T/\text{m}^{-3}$	$R/(\text{mm}/\text{h})$	$Z/\text{dBZ}$	$W/(\text{g}/\text{m}^3)$	$D_m/\text{mm}$	$\lg(N_w)/(\text{m}^{-3}/\text{mm})$	$\lg(N_0)/(\text{m}^{-1}/\text{mm}^{1+\mu})$	$\mu$	$\Lambda/\text{mm}^{-1}$
$R1$	189	3.4	22.9	0.04	1.1	4.6	5.37	3.97	7.85
$R2$	378	12.3	31.8	0.18	1.4	4.87	5.4	3.75	5.96
$R3$	507	22.5	36.2	0.36	1.6	5	4.79	3.54	4.99
$R4$	758	39.2	40.6	0.68	1.7	5.11	4.57	2.99	4.13
$R5$	1076	65.7	46.1	1.31	2.1	5.07	4.17	2.05	3.01
$R6$	2443	144.3	52.7	3.27	2.5	5.14	4.14	1.2	2.3

3 不同类型降水的雨滴谱特征和差异

因热力条件和微物理过程的差异,不同类型降水

通常形成不同的雨滴谱。本文采用 Chen 等<sup>[19]</sup> 的方法将雨滴谱分为层云降水和对流降水两类,即根据  $t_i-\Delta t$  到  $t_i+\Delta t$  ( $i$  为降水时刻,  $\Delta t$  取 5 min) 的雨强和标准差进行分类。如果雨强  $>5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  且标准差



$>1.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,则将其判断为对流降水;若雨强 $>0.1\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 且标准差 $<1.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,则将其归为层云降水。分类结果如表2所示,观测期间共筛选13506个样本,总累积雨量为1903.4 mm;其中,层云降水样本9294个,占总样本数的68.8%,对总雨量的贡献为13.34%;对流降水样本4212个,占总样本数的31.2%,对总雨量的贡献达86.66%。结果说明,虽然龙门地区的层云降水比例较大,但是对降水量的贡献和平均雨强却远小于对流降水。

表2 不同降水类型的样本数、累积雨量和平均雨强

降水类型	样本数 /个	累积雨量 /mm	平均雨强 /( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )
层云降水	9294 (68.8%)	254.01 (13.34%)	1.64
对流降水	4212 (31.2%)	1649.39 (86.36%)	23.50
总降水	13506	1903.40	8.46

对两类降水的雨滴谱进行统计,图4给出了雨滴谱的箱型图。可以看出,两类降水的雨滴谱都呈单峰分布,但由于对流降水有更多中大雨滴的贡献,其谱宽明显大于层云降水,倾斜率也更低。对流和层云降水的最大雨滴直径分别为5.5 mm和3.25 mm,最大数浓度均分布在0.5 mm附近。从雨滴数浓度的25%~75%

分位数来看,对流降水每个直径通道均大于层云降水。此外,层云降水在较小直径通道内( $D<2.125\text{ mm}$ )的数浓度相对比较分散,而对流降水在较大直径通道( $D\geq 2.125\text{ mm}$ )的数浓度相对比较分散。

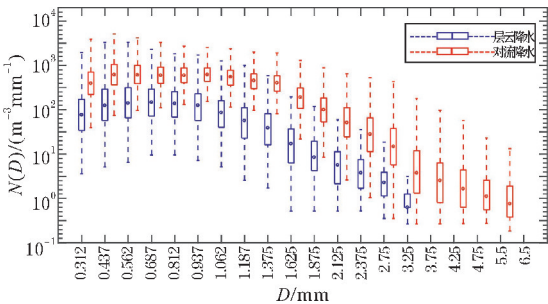


图4 层云降水和对流降水的雨滴谱箱型图(箱型图中间的圆代表中位数,底部表示25%分位数,顶部表示75%分位数。虚线延伸到数据点的最大值和最小值)

为进一步对比两类降水其他物理量和Gamma参数的差异,如图5统计了 $N_t$ 、 $Z$ 、 $D_m$ 、 $R$ 、 $W$ 、 $N_w$ 、 $N_0$ 、 $\Lambda$ 和 $\mu$ 的概率分布,表3给出了对应5%~95%分位数和平均值的结果。可见,对流降水的 $N_t$ 、 $Z$ 、 $D_m$ 、 $R$ 、 $W$ 和 $N_w$ 都比层云降水大;而对于Gamma参数,对流降水的 $N_0$ 、 $\Lambda$ 和 $\mu$ 则都比层云降水的小,分布更加集中。

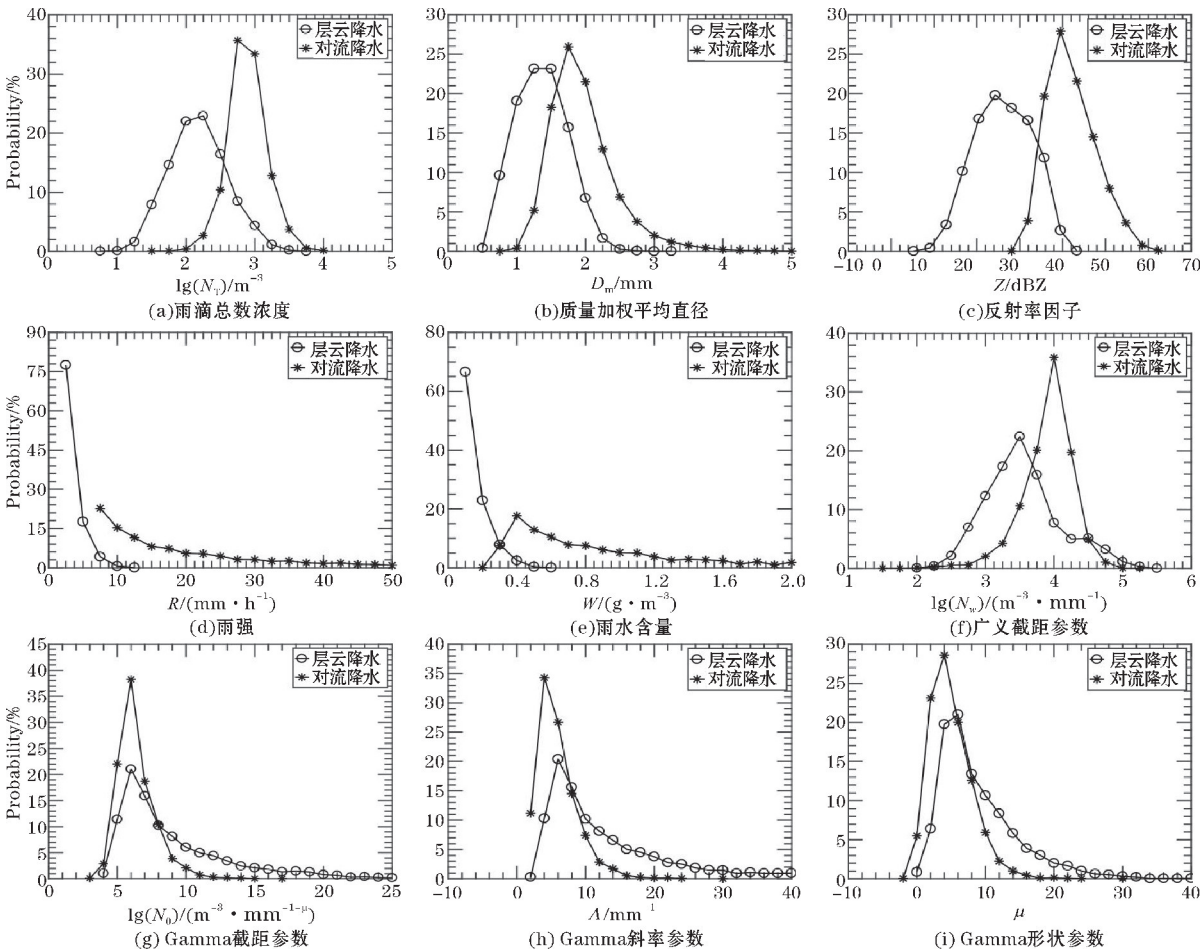


图5 层云降水和对流降水物理量和Gamma参数的概率分布图

表 3 两类降水物理量和 Gamma 参数的分位数和平均值统计结果

降水物理量和 Gamma 参数	降水类型	统计量						
		5%	25%	50%	75%	95%	平均	标准差
$R/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	层云降水	0.22	0.50	1.03	2.30	4.95	1.64	1.57
	对流降水	5.52	8.19	14.32	27.67	77.27	23.5	26.36
$W/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	层云降水	0.014	0.031	0.062	0.128	0.260	0.09	0.08
	对流降水	0.29	0.42	0.69	1.20	2.91	1.01	0.97
$Z/\text{dBZ}$	层云降水	12.68	18.71	23.88	29.41	34.87	23.95	6.93
	对流降水	32.34	36.21	39.72	44.43	51.83	40.65	5.89
$D_{\text{m}}/\text{mm}$	层云降水	0.64	0.95	1.23	1.49	1.86	1.23	0.37
	对流降水	1.23	1.51	1.75	2.06	2.76	1.84	0.492
$\lg(N_{\text{T}})/\text{m}^{-3}$	层云降水	1.50	1.88	2.16	2.46	2.91	2.18	0.42
	对流降水	2.44	2.73	2.88	3.04	3.35	2.89	0.27
$\lg(N_{\text{w}})/(\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1})$	层云降水	2.61	3.05	3.38	3.69	4.48	3.42	0.54
	对流降水	3.12	3.60	3.84	4.01	4.28	3.78	0.99
$\Lambda/\text{mm}^{-1}$	层云降水	3.41	5.50	8.57	14.64	32.35	11.81	9.44
	对流降水	1.47	2.85	4.26	6.32	10.43	4.94	3.06
$\mu$	层云降水	1.74	3.99	6.39	10.31	19.61	7.98	5.94
	对流降水	-0.11	1.77	3.44	5.74	9.63	4.01	3.56
$\lg(N_0)/(\text{m}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1-\mu})$	层云降水	3.35	4.39	5.73	8.36	15.35	7.03	3.90
	对流降水	3.20	3.99	4.58	5.53	7.48	4.89	1.40

为更好地量化龙门地区两类降水的雨滴谱差异,对两类降水的平均雨滴谱及 Gamma 拟合谱进一步对比,结果如图 6 所示。可见,层云降水的平均雨滴谱与 Gamma 拟合谱吻合程度稍大于对流降水,尤其对于小雨滴( $D<1\text{ mm}$ ),对流降水的拟合值存在一定的偏高,Chen 等<sup>[19]</sup>研究也发现类似现象。层云降水的拟合相关系数达到了 0.9193,而对流降水为 0.8324。整体而言,Gamma 模型基本能代表该地区两类降水的雨滴谱分布,两类降水平均谱的 Gamma 表达式分别为层状云降水:

$$N(D) = 4.677 \times 10^3 D^{0.994} \exp(-3.652D)$$

对流云降水:

$$N(D) = 3.890 \times 10^3 D^{0.028} \exp(-1.890D)$$

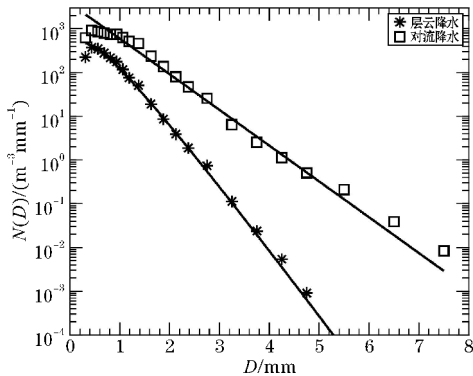


图 6 层云降水和对流降水的平均雨滴谱和 Gamma 拟合结果

4 降水的 Z-R 关系和  $\Lambda$ - $\mu$  关系

雷达定量估测降水大多以 Z-R 关系为基础,即  $Z=AR^b$ <sup>[20]</sup>,其中 A 和 b 为乘数和指数系数。本文采用非线性最小二乘法分别对两类降水的 Z-R 关系进行拟合,结果为

层云降水: $Z=313.1727R^{1.3760}$

对流降水: $Z=216.5220R^{1.5032}$

因不同地区降水的微观特征存在差异,使 A 和 b 系数的数值也存在明显区别<sup>[21]</sup>。因此,本文将龙门地区 Z-R 关系与目前气象雷达业务使用的  $Z=300R^{1.4}$  和 Wen 等<sup>[22]</sup>得到的华东地区的 Z-R 关系进行对比,结果如图 7 所示。对比可见,龙门地区的 Z-R 公式与业务使用的较为吻合,在相同 Z 情况下,华东地区的降水强度会大于龙门地区。

准确的  $\Lambda$ - $\mu$  关系有助于简化雨滴谱分布模型,进而为数值模式参数化方案优化提供基础<sup>[23]</sup>。为减小阶矩法误差对  $\Lambda$ - $\mu$  关系统计的影响,本文采取 Zhang 等提出的筛选条件,选取  $N_{\text{T}}>1000\text{ m}^{-3}$  且  $R>5\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的雨滴谱样本数据进行拟合,得到  $\Lambda$ - $\mu$  关系为

$$\Lambda=0.0334\mu^2+1.2296\mu+0.6982$$

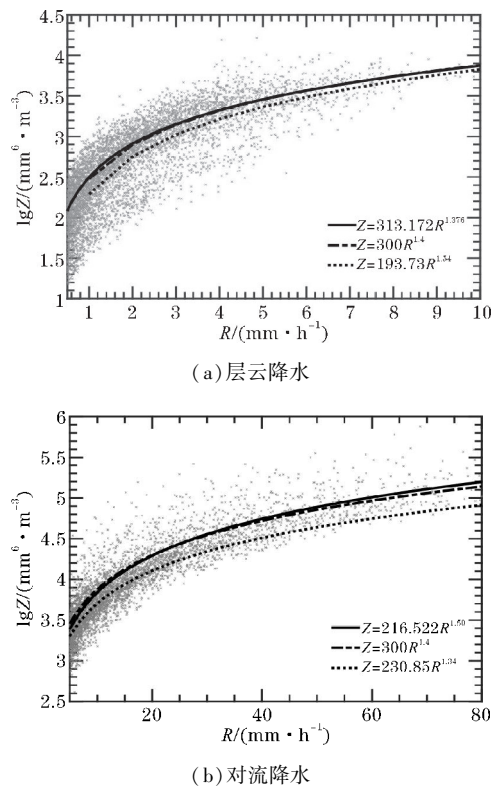


图 7 两类降水的 Z-R 分布散点图和拟合结果(实线为龙门地区 Z-R 关系,点实线为目前业务使用的 Z-R 关系,点线为华东地区的 Z-R 关系)

进一步将龙门地区的  $\Lambda$ - $\mu$  关系与 Kumar 等<sup>[2]</sup>在新加坡得到的  $\Lambda$ - $\mu$  关系和 Zhang 等<sup>[6]</sup>在美国佛罗里达得到的  $\Lambda$ - $\mu$  关系进行对比,结果如图 8 所示。可见,整体上  $\Lambda$  随着  $\mu$  增大而增大。当  $\Lambda$  和  $\mu$  较小时,龙门地区和美国佛罗里达地区的  $\Lambda$ - $\mu$  关系较为接近。当  $\Lambda$  和  $\mu$  较大时,同等  $\Lambda$  情况下,龙门地区的  $\mu$  最大,而美国佛罗里达地区的  $\mu$  最小。

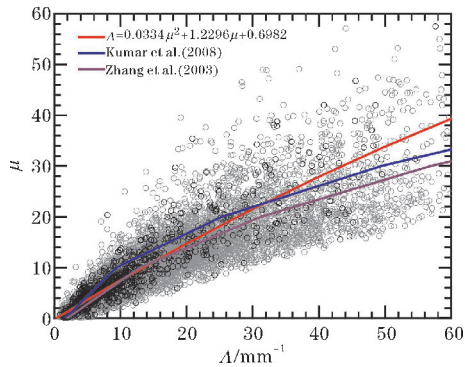


图 8 为广东龙门地区的  $\mu$  和  $\Lambda$  的散点分布及拟合结果(灰色圆圈表示所有样本,黑色圆圈表示筛选后的样本)

5 与其他地区的雨滴谱特征对比

$D_m$  和  $N_w$  反映了雨滴谱粒径和数浓度的综合情况,本文对龙门两类降水的  $D_m$ - $\lg N_w$  的均值和标准差进行了统计。如图 9 所示,其中蓝色为层云降水,红色

为对流降水,标记为平均值、短实线为标准差,斜虚线为 Bringi<sup>[5]</sup> 提出的对流降水和层云降水的分界线。此外,图中还标记出了其他 3 个地区的结果,三角形为青藏高原那曲地区<sup>[24]</sup>,五角星为江淮地区<sup>[25]</sup>,正方形为华北北京地区<sup>[26]</sup>。龙门地区层云降水和对流降水的  $D_m$ - $\lg N_w$  平均值分别为 1.234 ~ 3.422 和 1.842 ~ 3.781,标准差为 0.545 ~ 0.370 和 0.367 ~ 0.495,即对流降水的  $D_m$  和  $\lg N_w$  高于层云降水,粒径更大、数浓度更高。

与其他地区对比可见,龙门地区的两类降水的分布较好符合 Bringi 提出的分界线。对于层云降水,龙门地区的平均  $N_w$  最低,但平均  $D_m$  最大。对于对流降水,龙门地区的平均  $N_w$  仅大于那曲地区;平均  $D_m$  与北京接近,大于江淮地区,但小于那曲地区。对于华南龙门与华东江淮的差异, Wen 等<sup>[27]</sup>也得到了类似结论。产生这种现象的原因是较大的含水量使雨滴在下落过程中发生碰撞和凝聚,在雨滴沉降过程中,增加了  $D_m$  并在一定程度上降低了雨滴的浓度。相较于其他地区,那曲层云降水的  $D_m$  更小,但  $\lg N_w$  更大;对流降水的  $D_m$  更大,而  $\lg N_w$  更小;这可能与那曲高海拔、水汽较少的降水条件有关<sup>[11]</sup>。

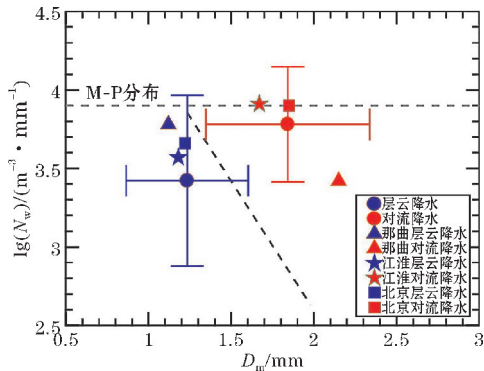


图 9 层云降水和对流降水的  $D_m$ - $N_w$  的平均值及标准差(蓝色为层云降水,红色为对流降水,黑色斜虚线为 Bringi<sup>[6]</sup> 观测的层状云降水分界线)

6 结论

利用 Parsivel<sup>2</sup> 激光雨滴谱获取的广东龙门 2019 年 4-9 月的雨滴谱数据,研究了不同雨强、不同类型降水的雨滴谱特征及其差异,提出该地两类降水的 Z-R 关系、 $\Lambda$ - $\mu$  关系和  $D_m$ - $N_w$  关系,并与国内外其他地区进行对比,得到的主要结论如下:

(1) 华南地区的降水样本主要集中在小雨强区间,但累积雨强的贡献量主要集中于大雨强区间。各个区间的雨滴数浓度整体都随着直径的增大呈单峰减少。降水物理量  $Z$ 、 $W$ 、 $N_T$ 、 $N_w$  和  $D_m$  也都随雨强增大



而增大。 $\Gamma$  参数  $N_0$ 、 $\Lambda$  和  $\mu$  都随着雨强增大而减小,即雨滴谱逐渐变宽、倾斜度变低。

(2) 龙门层云降水的样本比例较大,但是对总降水的贡献量和平均雨强却远小于对流降水。对流降水的谱形相较于层云降水更宽、倾斜率更低。对流降水的  $N_t$ 、 $Z$ 、 $D_m$ 、 $R$ 、 $W$  和  $N_w$  都大于层云降水。而  $N_0$ 、 $\Lambda$  和  $\mu$  则都比层云降水的小,分布更加集中。

(3) 龙门地区降水的  $Z$ - $R$  关系与传统公式较为相近,与华东地区相比,在  $Z$  相同的条件下,华东地区的  $R$  会更大。龙门地区雨滴谱的  $\Lambda$  和  $\mu$  之间具有较好的二项式关系,且与美国佛罗里达的观测结果接近。

(4) 与那曲、江淮和北京地区相比,龙门层云降水的  $N_w$  最低、平均  $D_m$  最大。而对于对流降水而言,龙门的平均  $N_w$  大于那曲地区,但较其他地区稍小;平均  $D_m$  小于那曲地区,但大于江淮地区。

## 参考文献:

- [1] Louis J, Battan. Hurricanes[J]. Science, 1973, 179 (4077): 1022.
- [2] Lakshmi Sutha Kumar, Yee Hui Lee, Jin Teong Ong. Two-Parameter Gamma Drop Size Distribution Models for Singapore[J]. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(9): 3371–3380.
- [3] Long W, Kun Zhao, Guifu Zhang, et al. Statistical characteristics of raindrop size distributions observed in East China during the Asian summer monsoon season using 2-D video disdrometer and Micro Rain Radar data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(5): 2265–2282.
- [4] Maki M, Kenan T D, Sasaki Y, et al. Characteristics of the raindrop size distribution in tropical continental squall lines observed in Darwin, Australia[J]. Appl Meteor, 2001, 40(8): 1393–1412.
- [5] V N Bringi, V Chandrasekar, J. Hubbert, et al. Schoenhuber. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis[J]. American Meteorological Society, 2003, 60(2): 354–365.
- [6] Zhang G F, Vivekanandan J, Brandes E A, et al. The shape-slope relation in observed gamma raindrop size distributions: Statistical error or useful information[J]. Atmos. Oceanic. Technol., 2003, 20(8): 1016–1119.
- [7] Chang W Y, Wang T C, Lin P L. 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]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2009, 26(10): 1973–1993.

- [8] 王洪, 雷恒池, 杨洁帆, 等. 山东不同云系降水微物理参数特征[J]. 大气科学, 2020, 44(2): 315–326.
- [9] 李岩瑛. 祁连山地区降水气候特征及其成因分析研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [10] 李慧, 银燕, 单云鹏, 等. 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, 2018, 42(2): 268–280.
- [11] 李山山, 王晓芳, 万蓉, 等. 青藏高原东坡不同海拔区域的雨滴谱特征[J]. 高原气象, 2020, 39(5): 899–911.
- [12] ZHENG Yongguang, XUE Ming, LI Bo, et al. Spatial characteristics of extreme rainfall over China with hourly through 24-hour accumulation periods based on national-level hourly rain gauge data [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(11): 1218–1232.
- [13] Tokay, Ali, Blahak, et al. PAR-SIVEL Snow Observations: A Critical Assessment[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(2): 333–344.
- [14] Chen B J, Hu Z Q, Liu L P, et al. Raindrop size distribution measurements at 4,500m on the Tibetan Plateau during TIPEXIII [J]. Geophys. Res., 2017, 122(20): 11092–11106.
- [15] D Atlas, R C Srivastava, R S Sekhon. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence[J]. John Wiley & Sons, Ltd, 1973, 11(1): 1–35.
- [16] Tokay A, Petersen W A, Gatlin P, et al. Comparison of raindrop size distribution measurements by collocated disdrometers[J]. Atmos. Ocean. Technol. 2013, 30, 1672–1690.
- [17] Ulbrich C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution[J]. Clim Appl Meteorol. 1983, 22, 1764–1775.
- [18] Cao Qing, Zhang Guifu. Errors in Estimating Raindrop Size Distribution Parameters Employing Disdrometer and Simulated Raindrop Spectra[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2009, 48(2): 406–425.

- [19] CHEN Baojun, YANG Jun, PU Jiangping. Statistical Characteristics of Raindrop Size Distribution in the Meiyu Season Observed in Eastern China [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 2013, 91(2): 215–227.
- [20] 赵城城, 张乐坚, 梁海河, 等. 北京山区和平原地区夏季雨滴谱特征分析[J]. 气象, 2021, 47(7): 830–842.
- [21] Rosenfeld D, Ulbrich C W. Cloud microphysical-properties, proceses, and rainfal estimation opportunities[J]. Meteor Monogr, 2003, 30(52): 237–258.
- [22] WEN Long, ZHAO Kun, WANG Mengyao, et al. Seasonal Variations of Observed RaindropSize Distribution in East China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(4): 346–362.
- [23] Brandes E A, Zhang G, Vivekanandan J. An evaluation of a drop distribution-based rainfall estimator[J]. Appl. Meteorol. 2003, 42: 652–660.
- [24] Chen B, Hu Z, Liu L, et al. Raindrop size distribution measurements at 4,500 m on the Tibetan Plateau during TIPEX-III[J]. Geophys. Res. : Atmos. , 2017, 122(20): 11,092–11,106.
- [25] 金祺, 袁野, 刘慧娟, 等. 江淮之间夏季雨滴谱特征分析[J]. 气象学报, 2015, 73(4): 778–788.
- [26] Ji L, Chen H, Li L, et al. Raindrop size distributions and rain characteristics observed by a PAR-SIVEL disdrometer in Beijing, Northern China [J]. Remote Sens, 2019, 11(12): 1479.
- [27] Wen L, Zhao K, Zhang G, et al. Statistical characteristics of raindrop size distributions observed in East China during the Asian summer monsoon season using 2D videodisdrometer and Micro Rain Radar data [J]. Geophys, Res, 2016, 121(5): 2265–2282.

## Raindrop Spectrum Characteristics in Longmen Guangdong Province

WANG Yingjue<sup>1</sup>, PENG Siyue<sup>1</sup>, ZHANG Haoran<sup>1</sup>, ZHENG Jiafeng<sup>1</sup>, ZENG Zhengmao<sup>2</sup>, TANG Shunxian<sup>3</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 2. Fujian Provincial Meteorological Information Centre, Fujiang 100081, China; 3. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** To study the microphysical characteristics of precipitation in the Longmen region of South China, the characteristics and differences of the raindrop spectra for different intensities and types of precipitation in the region were analyzed using laser raindrop spectral observations data from April to September 2019. And based on this analysis, the local radar reflectivity factor versus precipitation intensity ( $Z-R$ ) relationships and Gamma slope parameter and shape parameter ( $\Lambda-\mu$ ) relationships is proposed, which is compared with other regions. The results show that the raindrop spectrum in the Longmen area gradually becomes wider and less inclined as the rain intensity increases. The mostly precipitation type of Longmen area is stratiform precipitation, but the accumulated precipitation is mainly contributed by convective precipitation. The  $Z-R$  relationship for the Longmen area is consistent with the traditional one, and the  $\Lambda$  and  $\mu$  of the raindrop spectrum fit well with the binomial relationship and are close to those observed in Florida, USA. Compared with Beijing, Nagqu and Jianghuai, for the stratus cloud precipitation, the average generalized intercept parameter  $N_w$  is lowest for Longmen, but the mean diameter is the largest; for convective precipitation, the mean  $N_w$  is larger than that of the Nagqu region, but smaller than that of the North China and Jianghuai regions, and the mean  $D_m$  is smaller than that of the Nagqu region, but larger than that of the Jianghuai region.

**Keywords:** atmospheric physics and atmospheric environment; physics of cloud and precipitation; longmen of Guangdong; raindrop spectral characteristics; stratiform and convective precipitation