

基于雨强分级的夏季降水微物理特征分析

杨长业 舒小健* 高太长 刘西川

(解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

摘要 利用南京地区 2013—2014 年夏季 Parsivel 激光雨滴谱观测资料, 讨论了小、中、大、暴 4 种降水强度等级的微物理参量演变特性、雨滴谱形状因子 μ 与尺度参数 λ 关系、雷达反射率因子 Z 与降水强度 R 关系。结果表明: ①不同强度等级降水的粒子平均直径差异较小, 降水粒子数浓度、单位体积含水量、单位时间降水能量均随降水强度等级的增强而增大。②在小雨阶段, Gamma 分布函数会高估 D 小于 0.625 mm 的粒子数, 在暴雨阶段会低估 D 小于 1 mm 的粒子数; 不同强度等级降水的 μ - λ 间均存在较好的二项式函数关系, 小雨样本的拟合曲线与所有样本拟合曲线接近, 中雨、大雨与 R 大于 5 mm/h 样本拟合曲线接近, 暴雨则高于 R 大于 5 mm/h 样本拟合曲线。③夏季降水的 Z - R 间存在较好的指数关系, 但如果采用所有样本拟合关系估计降水, 会存在高估暴雨阶段降水强度的现象。

关键词 降水微物理参量; 分级雨强; Gamma 分布; μ - λ 关系; Z - R 关系

引言

夏季降水常在有利天气背景条件下, 经过复杂的云物理过程形成和发展的, 具有突发性强, 短时降雨量大等特点, 容易引发洪涝, 泥石流, 山体滑坡等自然灾害。国内外已经有许多学者从不同的角度对其进行了研究^[1-3], 其中降水微物理特征的研究可以为对流性降水形成与发展机制, 土壤侵蚀机理, 人工影响天气以及数值模拟等方面的研究提供重要的科学依据^[4-5]。

从 20 世纪 90 年代开始, 国内学者对降水微物理特征展开了广泛的研究, 宫福久^[6]等研究了层状云、积层混合云、积雨云的降水微物理特征参量随时间演变特性, 指出 3 类降水云降水微物理特征参量均具有较大的起伏变化。周黎明等^[7]分析了山东省一次典型积层混合云降水微物理特征参量之间的关系, 指出降水强度与雨滴数密度、降水液态含水量等参量随时间演变特性呈强相关关系。濮江平等^[8]对南海一次对流云降水资料的微物理参量进行分析,

指出降水过程小滴数目占绝大部分, 但大滴数目也较多, 大滴对降水强度、含水量、雷达反射率因子贡献很大。Zhang 等^[4]基于降水强度大于 5 mm/h 的样本分析雨滴谱形状因子 μ 和尺度参数 λ 之间存在二项式关系; Moisseev 等^[9]讨论了雨滴谱参数 μ - λ 与降水强度之间的关系, 并指出雨滴谱参量变化范围随着雨强的增大而减小; 陈磊等^[10]基于降水强度大于 2 mm/h 的雨滴谱数据分析 μ - λ 关系, 进一步指出江淮地区的梅雨峰暴雨也存在二项式关系。

综上所述, 前人对降水微物理特征参量的研究做了很大的贡献, 但也存在以下两方面可以改进: ①上述研究虽然探讨了雨滴直径, 数密度, 含水量等微物理参量随时间演变特性, 但是很少涉及降水动能随时间演变特性及其与降水强度的相关关系。②雨滴谱参量变化范围随着雨强的增大而减小, 使得雨强较大时所对应的谱参数变化范围被雨强较小时所对应的谱参数变化范围所覆盖, 造成统一的 μ - λ 关系无法代表雨强较大时的 μ - λ 关系。因此为了进一步探究夏季降水微物理特性, 为更为精细化云物理

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家自然科学基金项目“降水瞬态微物理特征测量仪”(41327003)、“基于微波链路的区域降水反演”(41475020)、“非视距无线链路雨致信号特征及影响模型研究”(41405024)资助

作者简介: 杨长业, 男, 1963 年生, 硕士, 副教授, 主要从事气象仪器及自动化技术研究, Email: 2558185157@qq.com

收稿日期: 2015 年 5 月有 19 日; 定稿日期: 2015 年 9 月 1 日

通信作者: Email: 734675624@qq.com

方案提供依据,本文利用 Parsivel 激光雨滴谱仪在南京夏季降雨观测资料,按降水强度将其分为小雨、中雨、大雨、暴雨,分析不同强度等级降水的微物理参量特别是降水动能的演变特性,讨论雨滴谱参数 μ - λ 和 Z - R 在不同强度等级降水的关系及一致性问题。

1 资料收集与预处理

资料选取自架设在南京市江宁区(118. 819°E, 31. 972°N)观测场的 Parsivel 激光雨滴谱仪 2013、2014 年夏季观测资料,以 1 min 为采样间隔;当降水粒子穿越仪器采样空间时,记录粒子对激光束产生衰减与遮蔽的宽度和时间得到粒子的尺度和速度进行测量^[8],其中粒子速度测量范围为 0. 2~20 m/s,尺度测量范围为 0. 2~25 mm。

夏季降水常以强对流天气为主,如 2014 年 7 月 4 日从 10:44 开始,到次日 13:25 结束的降水过程,持续 26 h,累积降水量为 94. 86 mm;不同时刻降水强度变化剧烈、迅速,瞬时雨强最大可达 100 mm/h,

具有典型的强对流性天气特征;将收集的 7853 个雨滴谱观测样本按小雨、中雨、大雨、暴雨 4 个强度等级^[11]进行分类,具体结果见表 1。

Parsivel 激光雨滴谱仪在观测自然降水时,受降水粒子间相互遮挡、重叠以及仪器自身原因的影响,部分小粒子具有极大的下落速度,部分大粒子拥有极小的下落速度;针对异常值本文采用以下 3 步进行处理:首先,利用如下公式修正所有测量雨滴的等效球形直径^[12]:

$$D_q = \begin{cases} D_{par} & D_{par} \leq 1 \text{ mm} \\ (1.075 - 0.075D_{par})D_{par}, & 1 \text{ mm} < D_{par} < 5 \text{ mm} \\ 0.7D_{par} & D_{par} \geq 5 \text{ mm} \end{cases}$$

其中 D_q 表示雨滴等效球形直径, D_{par} 表示 Parsivel 测得的雨滴直径。其次,剔除直径大于 6 mm 的雨滴;最后,依据雨滴直径与下落末速度之间对应关系,采用 3σ 准则,分别对同一直径级测得的速度值(即同一直径级对应的有降水粒子的不同速度级)进行检验,剔除异常值数据。

表 1 收集的雨滴谱观测样本按降雨强度等级分类标准

观测时间	小雨	中雨	大雨	暴雨
	(0. 5~2. 5 mm/h)	(2. 6~8. 0 mm/h)	(8. 1~15. 9 mm/h)	≥ 16 mm/h
2013-06	1176	222	151	88
2013-07	585	704	201	80
2014-06	160	109	46	37
2014-07	1549	709	295	181
2014-08	1116	376	127	41
总样本数	4586	2120	720	427

2 降水微物理特征分析

降水微物理参量反映了一次降水的性质和变化特征,主要包括粒子直径,数密度,含水量等。粒子直径主要表征单位体积空间上降水粒子的尺度特性,这里主要选取平均直径、质量加权直径和质量加权谱标准差进行分析;除此之外,还选取了数密度,含水量,降水强度等表征单位体积内降水粒子空间分布特征的微物理参量进行分析;由于激光雨滴谱仪能提供较为准确的粒子速度信息,继而可分析单位面积上降水能量变化特征;具体分析参量及计算公式如表 2 所示,其中 D 表示雨滴直径, $N(D)$ 表示

雨滴谱分布, $V(D)$ 表示经验速度直径关系, f_i 表示某直径的雨滴体积占总体积的比例, T 表示观测时间, ρ 表示水密度这里取 1 g/cm³。

不同强度等级降水微物理参量平均值如表 3 所示,均与降水强度等级呈正相关关系,但具有各自的特点:①不同强度等级降水的粒子平均直径随着降水强度等级的增大而增大,可能与 Parsivel 激光雨滴谱仪在雨强较大时测量的小滴数较少^[13]有关;②质量加权平均直径和质量加权谱标准差变化较大,暴雨的质量加权平均直径和谱标准差分别是小雨的 2. 0 倍和 2. 3 倍,反映了暴雨的雨滴谱整体较高较宽的特点;③降水粒子数浓度、单位体积含水量

表 2 降水微物理特征量的含义及计算公式

微物理特征量	计算公式	含义
平均直径/mm	$D_1 = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) D dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) dD}$	表示单位体积内所有粒子的平均直径
质量加权平均直径/mm	$D_m = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \rho D^4 dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \rho D^3 dD}$	表示单位体积内所有粒子直径加权质量相对于粒子总质量的平均直径
质量加权谱标准差/mm	$\sigma_m^2 = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) (D - D_m)^2 \rho D^3 dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \rho D^3 dD}$	表示单位体积内所有粒子直径与其质量加权平均直径之间的偏离程度
粒子数密度/m ⁻³	$N = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) dD$	表示单位体积内粒子的总数
降水强度/(mm·h ⁻¹)	$I = \frac{\pi}{6} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \rho D^3 V(D) dD$	表示单位时间内地面上积水深度
雷达反射率因子/(mm ⁶ ·m ⁻³)	$Z = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) D^6 dD$	表示单位体积内粒子后向反射截面的总和；
含水量/(mg·m ⁻³)	$W = \frac{\pi}{6} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \rho D^3 dD$	表示单位体积内粒子总质量
水体雨滴动能/(J·m ⁻² ·mm ⁻¹)	$e_K = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^k f_i v_i^2$	表示单位地表面上降雨深度(1 mm)的平均降雨动能
单位时间降水动能/(J·m ⁻² ·min ⁻¹)	$E = \frac{Re_K}{T}$	表示单位时间(1min)单位面积上降雨对应的动能

均随降水强度等级的提高而急剧增加,中雨、大雨、暴雨对应的数密度分别是小雨的 3 倍、4.7 倍、11.4 倍,对应的雨强分别是 3.8 倍、9.2 倍、27.3 倍;④不同强度等级降水其水体雨滴动能差异不大,但单位

时间动能有很大的差别,特别是暴雨其单位时间动能是大雨的 3.8 倍,是中雨的 11 倍,更是小雨 61 倍,可见暴雨含有非常巨大的能量。

表 3 不同强度等级降水微物理参量平均特性

强度等级	累计样本数	累积时间/h	$\frac{D_1}{\text{mm}}$	$\frac{D_m}{\text{mm}}$	$\frac{N}{\text{m}^{-3}}$	$\frac{\sigma_m}{\text{mm}}$	$\frac{R}{\text{mm} \cdot \text{h}}$	$\frac{W}{\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}}$	$\frac{e_K}{\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}}$	$\frac{E}{\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}}$
小雨	4586	76.43	0.74	1.16	87.01	0.39	1.18	73.85	11.61	0.24
中雨	2120	35.33	0.87	1.55	261.50	0.57	4.50	224.26	17.05	1.32
大雨	720	12	0.96	1.87	410.17	0.71	10.92	485.33	21.11	3.86
暴雨	427	7.12	1.02	2.29	993.63	0.91	32.24	1255.58	25.54	14.56

夏季降水微物理参量随时间的演变特征,可从 4 种降水强度等级随时间的发展变化进行分析,典型案例如图 1 所示,2014 年 7 月 4—5 日的强对流天气事件,整个降水过程以小雨为主,暴雨多出现在降水强度的峰值区,这些峰值区呈现不同的特点:①

阵性峰值:小→暴→中→小,中→暴→小等,呈现降水强度突增,持续时间短特点,如 2014 年 7 月 4 日 23:40—00:00 阶段,对应微物理参量会发生陡增现象,仅短短的 10 min,降水强度从 3.77 mm·h⁻¹陡增到 94.98 mm·h⁻¹,单位时间降水能量从

1.08 J·m⁻²·min⁻¹陡增到 -349.5 J·m⁻² min⁻¹, 单位体积含水量从 207.3 mg·m⁻³陡增到 3462.3 mg·m⁻³; ②持续渐进型峰值:中→大→暴→大→暴→大→中等, 呈现降水量大, 持续时间长的特点, 如 2014 年 7 月 5 日 04:10—06:50 阶段, 该过程持续 150 min, 对应的微物理参量维持在一个较高水平, 降水强度平均为 13.4 mm/h, 累积降水量达到 29.3 mm, 单位时间降水能量平均为 5.9 J·m⁻²·min⁻¹, 累积能量达到 769.4 J·m⁻²。

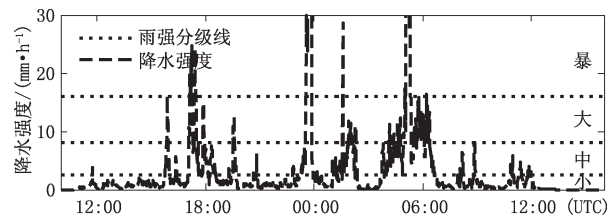


图 1 实测 2014 年 7 月 4—5 日降水强度等级分类和随时间变化

单位时间降水能量的变化对于分析降水对土壤侵蚀能有很重要的意义^[14], 它主要是通过水体雨滴动能 e_K 计算得来, 国内外许多学者已对此进行了研究, Kinnell 等^[15] 对美国 18 个风暴样本进行分析, 得到了水体雨滴动能随时间呈负指数变化关系, 极值是 36.8 J·m⁻²·mm⁻¹, Dijk 等^[16] 进一步对此进行研究, 指出水体雨滴动能与降水强度之间满足对数函数分布关系, 本文根据激光雨滴谱仪实测速度谱数据所计算的水体雨滴动能 e_K 和降水强度 R , 采用对数分布函数拟合公式如下, 拟合情况如图 2 所示, 得到与 Kinnell 相近的结果。

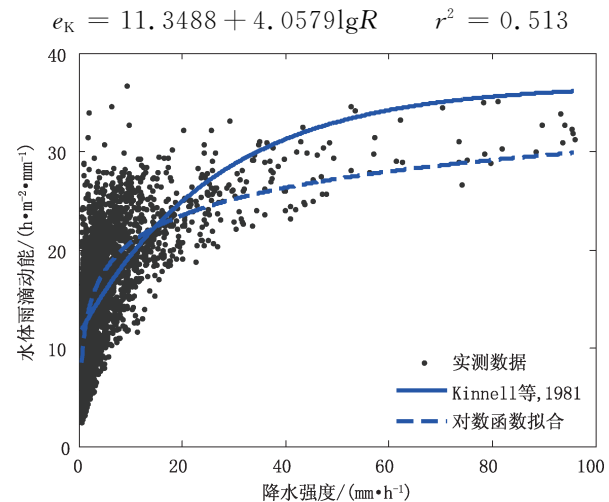


图 2 水体雨滴动能随降水强度的变化

3 谱分布特征分析

3.1 雨滴谱函数的选择

雨滴谱分布常用 M-P 分布和 Gamma 分布函数来描述, M-P 分布对层状云雨滴谱拟合结果较好, 但会高估对流云大滴部分; 而 Gamma 分布函数更具有普适性, 特别在大滴段的拟合具有较好的一致性^[10], 故本文采用 Gamma 分布来拟合实测雨滴谱:

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\lambda D)$$

其中, N_0 表示与粒子浓度相关的参数; μ 表征雨滴谱的形状; λ 表征雨滴谱的斜率。

对于 Gamma 函数的拟合, 常采用阶矩法估计谱参数, Cao 等^[17] 讨论了不同阶矩量模拟雨滴谱的拟合误差, 指出雨强越大拟合误差越小, 阶量越小拟合误差越小, 6 阶矩与雷达反射率因子成正比, 但实际雨滴谱并不完全服从 Gamma 分布, 综合考虑, 本文沿用 Zhang 等所采用 2、4、6 阶矩对 Gamma 函数中的 3 个参数进行估计。

其中第 n 阶矩定义为:

$$M_n = \int_0^\infty N(D) D^n dD = \frac{N_0 [\Gamma(n + \mu + 1)]}{\lambda^{n+\mu+1}}$$

估计 Gamma 分布参数方法为:

$$\begin{cases} \eta = \frac{M_4^2}{M_2 M_6}, & \mu = \frac{(7 - 11\eta) - (\eta^2 + 14\eta + 1)^{0.5}}{2(\eta - 1)} \\ \lambda = \left[\frac{M_2}{M_4} (\mu + 3)(\mu + 4) \right]^{0.5}, & N_0 = \frac{M_2 \lambda^{(\mu+3)}}{\Gamma(\mu + 3)} \end{cases}$$

采用上述方法对所有雨滴谱样本进行拟合, 其平均谱拟合结果如图 3 所示, 从图中可以看出在小雨阶段, Gamma 分布函数会高估 $D < 0.625$ mm 的粒子数, 在暴雨阶段会低估 $D < 1$ mm 的粒子数; 4 种强度等级降水在 $D > 1$ mm 的部分均有较好的拟合效果。

3.2 雨滴谱参量 μ - λ 关系

大量研究表明, 探索雨滴谱分布参数 μ 和 λ 之间的关系, 在参数化云物理模式、偏振雷达定量反演降水、卫星反演降水等方面有重要的应用价值^[18-19]。Zhang、Moisseev、Cao 等均已证明雨滴谱分布参数 μ 和 λ 之间存在较好的二次函数关系, 故本文采用二项式函数对其进行拟合, 但这一关系式存在不确定性^[20], 为了验证经验拟合 μ - λ 关系式的准确性, 这里采用 Cao 等提出的检验实测质量加权平均直径 D_m 和质量加权谱标准差 σ_m 数据与使用

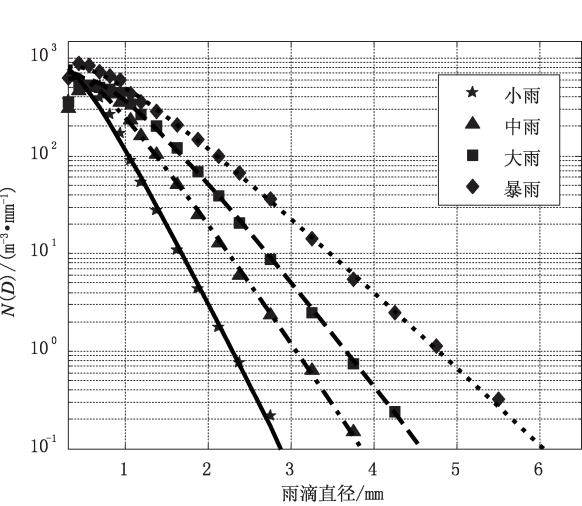


图 3 不同强度等级降水平均谱分布

经验 μ - λ 关系式所计算 D_m - $\tilde{\sigma}_m$ 数据之间的一致性方法对其进行验证。具体计算公式可通过联立表 2 中 D_m , σ_m 的定义式与 n 阶矩定义式得到：

$$\begin{cases} D_m = \frac{M_4}{M_3} = \frac{1}{\lambda} \frac{\Gamma(\mu+5)}{\Gamma(\mu+4)} \\ \sigma_m^2 = \frac{M_5 - 2D_m M_4 + D_m^2 M_3}{M_3} = \frac{1}{\lambda^2} \frac{\Gamma(\mu+6)}{\Gamma(\mu+4)} - D_m^2 \end{cases}$$

对所有样本 ($R>0.5\text{ mm/h}$) 的 μ - λ 数据采用二次函数拟合并进行检验,结果如图 4 所示,从图 4b 中可以看出利用 μ - λ 关系计算 $\tilde{D}_m$ - $\tilde{\sigma}_m$ 关系与实际观测的 D_m - σ_m 数据之间具有较好的一致性, D_m 与 $\tilde{D}_m$ 的平均绝对偏差 $<|D_m - \tilde{D}_m|>$ 为 0.158 mm, 相关系数为 0.895, σ_m 与 $\tilde{\sigma}_m$ 的平均绝对偏差为 0.025 mm, 相关系数为 0.988。

从 4a 图中可以看出中雨、大雨、暴雨阶段的 μ - λ 数据被小雨阶段所覆盖,而 $R>5\text{ mm/h}$ 对应样本的拟合曲线较 $R>0.5\text{ mm/h}$ 所有样本拟合曲线与 Zhang 等的经验关系曲线更为接近,说明降水强度的范围可能会影响 μ - λ 关系。因此,本文对不同降水强度等级的 μ - λ 数据进行拟合及检验,得到了如表 4 与图 5 所示的结果。

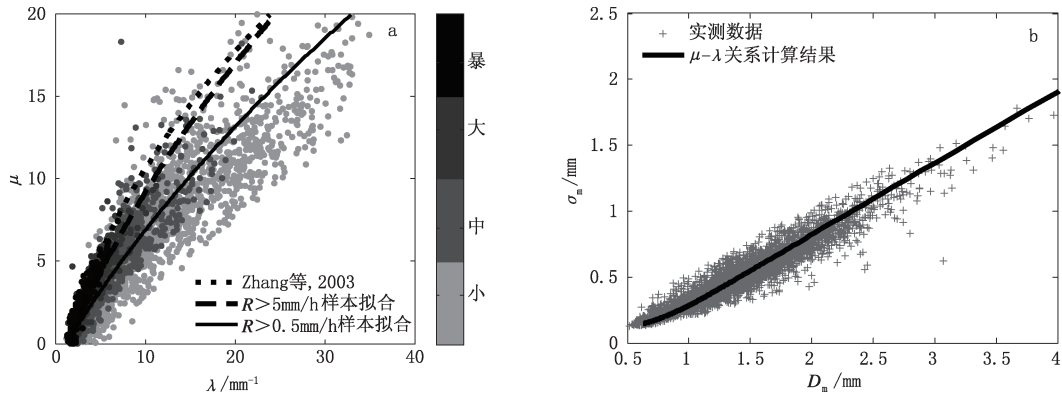


图 4 实测雨滴谱参数 μ 和 λ 关系(a);实测 D_m - σ_m 散点图和采用经验公式计算 D_m - σ_m 关系(b)

表 4 不同降水强度等级所对应的 μ - λ 二项式拟合关系

样本集	$\lambda = A\mu^2 + B\mu + C$				D_m 与 $\tilde{D}_m$		σ_m 与 $\tilde{\sigma}_m$	
	A	B	C	r^2	偏差/mm	相关系数	偏差/mm	相关系数
$R>0.5\text{ mm/h}$	0.024	1.118	1.216	0.904	0.158	0.895	0.026	0.989
$R>5\text{ mm/h}$	0.020	0.748	1.448	0.916	0.105	0.820	0.012	0.982
小雨	0.018	1.198	1.682	0.894	0.009	0.828	0.003	0.983
中雨	0.001	1.095	1.270	0.899	0.013	0.857	0.004	0.988
大雨	0.032	0.619	1.654	0.927	0.019	0.842	0.004	0.984
暴雨	0.044	0.468	1.475	0.937	0.029	0.865	0.004	0.986
Zhang 等	0.037	0.375	1.935	0.901				

联合表 4 和图 5 结果分析可知:①随着降水强度等级提高对应的雨滴谱特征参数 μ 和 λ 的范围越小,拟合结果的相关系数越高;②不同强度等级雨滴谱参数之间均具有较好的二项式拟合关系,其对应的质量加权平均直径和质量加权谱标准差的平均绝对偏差均较小,且计算值与实测值之间均具有较好的相关性;③随着降水强度等级的增大,样本的拟

合曲线会逐渐抬升,小雨样本的拟合曲线与 $R>0.5$ mm/h 样本即所有样本拟合曲线接近,中雨、大雨逐渐与 $R>5$ mm/h 样本拟合曲线接近,暴雨样本则高于 $R>5$ mm/h 样本拟合曲线;因此, μ - λ 关系会随着降水强度等级变化而变化, μ - λ 关系在一定的降水强度范围内更为适用。

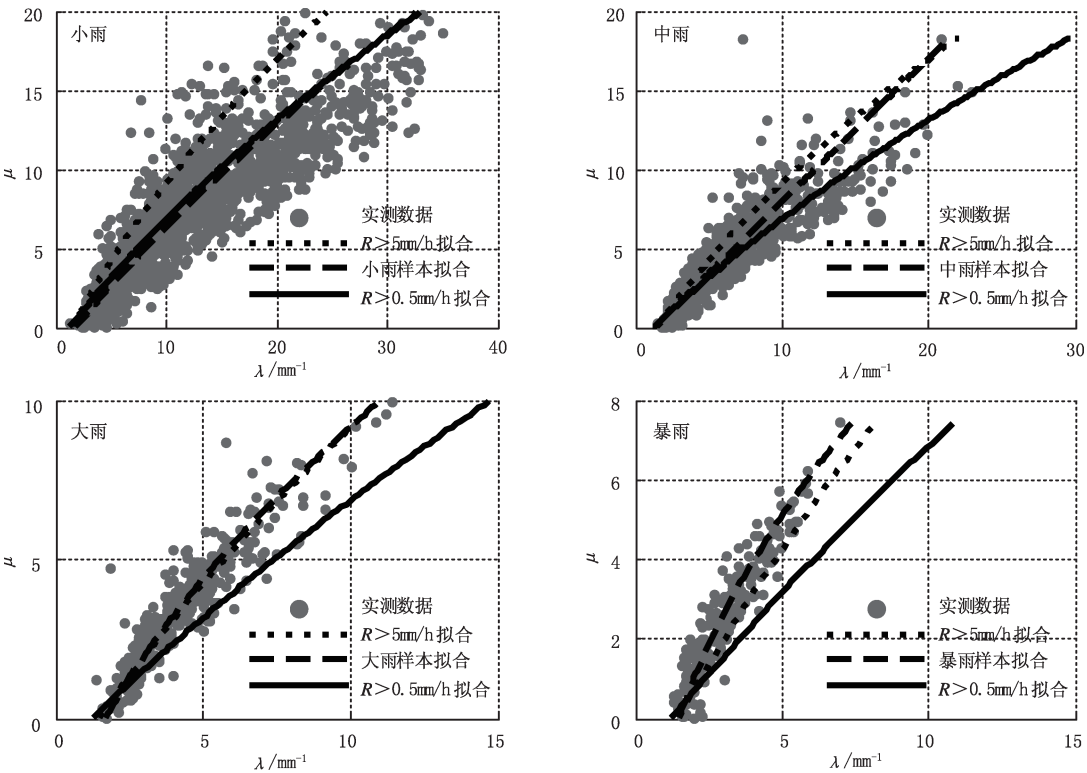


图 5 不同强度等级降水雨滴谱特征参数 μ 和 λ 之间的关系

4 Z-R 关系分析

研究雷达反射率因子与雨强之间的关系对天气雷达定量估测降水具有重要的意义^[21-22],由雷达反射率因子与降水强度计算公式(表 2)可以看出,决定二者变化最主要的因素是雨滴谱 $N(D)$,而夏季对流性降水过程雨滴谱变化剧烈,不同降水强度对应的雨滴谱变化有很大的不同,那会不会出现不同强度等级降水所对应的雷达反射率因子 Z 和降水强度 R 之间的拟合关系不相同的现象呢? 据此,对不同强度等级降水所对应的 Z - R 数据采用指数型关系进行拟合情况如表 5 和图 6 所示。

表 5 不同强度等级降水 Z - R 关系

雨强等级/(mm·h ⁻¹)	$Z = aR^b$ 关系	相关系数 r^2
小(≤ 2.5)	$Z = 232.99R^{1.45}$	0.707
中(2.6~8.0)	$Z = 226.01R^{1.65}$	0.681
大(8.1~15.9)	$Z = 254.51R^{1.32}$	0.416
暴(≥ 16)	$Z = 202.69R^{1.75}$	0.906
所有样本(>0.5)	$Z = 232.90R^{1.53}$	0.936
天气雷达内置关系	$Z = 300R^{1.4}$	

联合图 6 和表 5 分析可知:①总的来说,整个夏季降水的雷达反射率因子与降水强度之间存在较好的指数关系,不同强度等级降水 Z - R 数据集之间相互重叠的区域很少;②所有样本的拟合系数与小雨

阶段的拟合系数相接近,小、中、暴雨阶段拟合系数 a 随着降水强度的增大逐渐减小,系数 b 逐渐增大;
③大雨拟合相关系数较低,原因可从图 6 中看出,大雨数据相对比较的集中,呈现线性的趋势并不明显;所有样本拟合 $Z-R$ 关系相关系数最高,但采用所有样本拟合关系会存在高估暴雨阶段降水强度的现象。

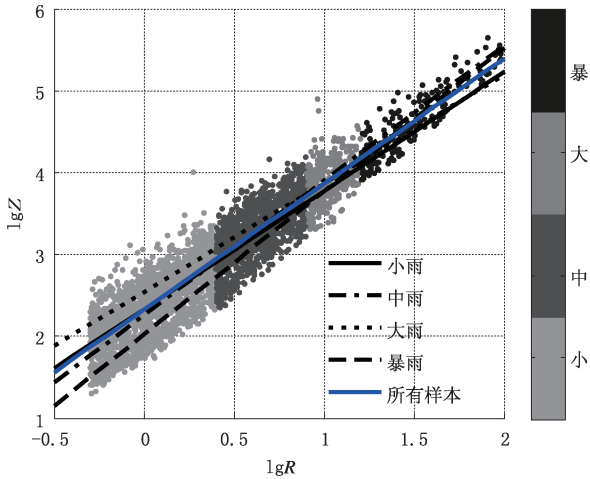


图 6 不同强度等级降水对应的 $Z-R$ 关系

5 结论

本文根据降水强度特征,将夏季降水分为小雨、中雨、大雨、暴雨 4 个强度等级,通过讨论不同强度等级的降水微物理参量、雨滴谱参数、 $Z-R$ 关系得出如下结论:

(1)不同强度等级降水的粒子平均直径差异不大,降水粒子数浓度、单位体积含水量,单位时间降水能量均随降水强度等级的提高而急剧增加。

(2)利用激光雨滴谱仪实测速度谱数据计算出水体雨滴动能 e_K 和强度 R ,采用对数函数进行拟合得到 e_K 与 R 之间的关系式,相关系数为 0.513。

(3)采用 Gamma 分布函数拟合不同降水强度等级的平均雨滴谱,可以得出小雨阶段, Gamma 分布函数会高估 $D<0.625\text{ mm}$ 的粒子数,在暴雨阶段会低估 $D<1\text{ mm}$ 的粒子数;4 种强度等级降水在 $D>1\text{ mm}$ 的部分都有很好的拟合效果。

(4) $\mu-\lambda$ 关系会随着降水强度等级变化而变化,小雨样本的拟合曲线与 $R>0.5\text{ mm/h}$ 样本即所有样本拟合曲线接近,中雨、大雨与 $R>5\text{ mm/h}$ 样本拟合曲线接近,暴雨样本则高于 $R>5\text{ mm/h}$ 样本

拟合曲线,因此 $\mu-\lambda$ 关系在一定的降水强度范围内更为适用。

(5)整个夏季降水的雷达反射率因子与降水强度之间存在较好的指数关系,不同强度等级降水 $Z-R$ 数据集之间相互重叠的区域较少;所有样本 $Z-R$ 关系拟合相关系数最大,但如果采用所有样本拟合关系会存在高估暴雨阶段降水强度的现象。

参考文献

[1] 杨晓霞,王金东,姜鹏,等. 山东半岛南部一次沿海强降雨成因分析[J]. 气象科技,2015,43(3):512-521.
[2] 高留喜,李静,刘畅,等. 山东省短时极端强降水研究[J]. 气象科技,2014,42(3):482-487.
[3] 张磊,何晖,黄梦宇,等. 一次降水性层状云微物理过程分析[J]. 气象科技,2013,41(4):742-747.
[4] Zhang G, Vivekannandan J, Brandes E A, et al. The shape-slope relation in observed Gamma raindrop size distribution: Statistical error or useful information [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2003, 20(8): 1106-1119.
[5] 刘西川,高太长,刘磊,等. 雨滴微物理特征研究及测量技术进展[J]. 地球科学进展,2013,28(11): 1217-1226.
[6] 宫福久,刘吉成,李子华. 三类降水云雨滴谱特征研究[J]. 大气科学,1997,21(5):607-614.
[7] 周黎明,张洪生,王俊,等. 一次典型积层混合云降水过程雨滴谱特征[J]. 气象科技,2010,38(增):74-77.
[8] 胡子浩,濮江平,濮云涛,等. 南海一次海洋性对流云降水雨滴谱特征分析[J]. 热带气象学报,2014,30(1): 181-188.
[9] Moisseev D N, V Chandrasekar. Examination of the slop-shape relation suggested for drop size distribution parameters [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2007, 24: 847-855.
[10] 陈磊,陈宝君,杨军,等. 2009-2010 年梅雨锋暴雨雨滴谱特征[J]. 大气科学学报,2013,36(4):481-488.
[11] 孙学金,王晓蕾,李浩,等. 大气探测学[M]. 北京: 气象出版社,2010:75-90.
[12] 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[J]. 气象科学,2011,31(6):732-736.
[13] 刘俊,马尚昌,杨笔峰,等. 一种激光雨滴谱仪小雨滴检测方法[J]. 气象科技,2013,41(4):603-613.
[14] 罗德,余新晓,董磊. 密云山区林冠层对天然降水能量影响的初步研究[J]. 水土保持学报,2008,22(3):

60-63.

[15] Kinnell P L A. Rainfall intensity kinetic energy relationships for soil loss prediction [J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45: 153-155.

[16] Van Dijk A J J M, Bruijnzeel L B, Rosewell C J. Rainfall intensity-kinetic energy relationships; a critical literature appraisal [J]. Journal of Hydrology, 2002,261: 1-23.

[17] Cao Q, Zhang G. Errors in estimating raindrop size distribution parameters employing disdrometer and simulated raindrop spectra [J]. J Appl Meteor Climat, 2009, 48(3): 406-425.

[18] Ulbrich C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution [J]. J Climate Appl Meteor, 1983, 22: 1764-1775.

[19] Cao Q, Zhang G, Brandes E, Schuur T, et al. Analysis of video disdrometer and polarimetric radar data to characterize rain microphysics in Oklahoma [J]. J Appl Meteor Climat, 2008, 47(8): 2238-2255.

[20] Seifert A. On the shape-slope relation of drop size distribution in convective rain [J]. J Appl Meteor, 2005, 44: 1146-1151.

[21] 刘红燕,雷恒池. 基于地面雨滴谱资料分析层状云和对流云降水的特征 [J]. 大气科学, 2006, 30(4): 693-702.

[22] 李建通,李柏,杨洪平,等. 雷达-雨量计联合估测区域降水量方法研究 I ——模式集成法的提出[J]. 气象科技, 2014,42(4):556-562.

Microphysical Features for Summer Rain Based on Rain Intensity Classification

Yang Changye Shu Xiaojian Gao Taichang Liu Xichuan
(Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101)

Abstract: Using the summer DSD data observed in Nanjing by Parsivel laser precipitation particle spectrometer, the microphysical features, DSD parameters μ - λ relationship, radar parameters Z - R relationship of rain intensities of four levels (light, moderate, heavy, very heavy) are analyzed. Results show that (1) the variation of the average drop diameter is small between different intensity levels, but with the increasing intensity level, the particle concentration, liquid water content, and kinetic energy contents increases; (2) Gamma drop size distribution may be greater than the number of $D<0.625$ mm particles at the light level and less than the number of $D<1$ mm particles at the very heavy level. Every intensity level has a good binomial function relationship between μ and λ . The fitted curves of the light-level samples and all samples are close, and the fitted curves of moderate and heavy levels are close to $R>5$ mm/h samples, and the very heavy rain has higher fitted curves than $R>5$ mm/h samples. As for whole summer rain, there exists a consistent Z - R relationship, but the Z - R relationship of all samples may lead to the overestimated rain intensity for very heavy precipitation.

Keywords: summer rain; microphysical feature; rain rate classification; Gamma DSD; μ - λ relationship; Z - R relationship