

利用激光降水粒子谱仪观测北京夏季雨滴谱特征

徐文静¹ 苏德斌¹ 伽丽丽¹ 于丽萍² 许仕清² 李栋²

(¹北京市气象局大气探测技术保障中心, 北京 100089)

²北京市观象台, 北京 100176

摘要 雨滴谱(DSD)反映了云及降水物理学特性,是推导降水强度、雷达反射率因子等物理参量的基本要素,取决于水凝物由冰晶或云水转化为地面降水这一复杂微物理过程。为更好地了解北京地区夏季降水雨滴谱特征,利用 Parsivel 激光降水粒子谱仪于 2007 年 7 月至 8 月间在北京市观象台进行观测,得出不同降水类型的雨滴谱分布以及雨滴质量加权平均直径、最大直径和降水强度等微物理参量,对观测数据进行拟合确定不同降水类型 M-P 谱分布函数参数值。结果表明北京夏季降水过程中直径在 0.2~1.5 mm 之间的小雨滴对雨滴数密度贡献均大于直径超过 2.0 mm 的大雨滴,对流云降水的雨滴谱比层云的更宽,大雨滴所占比例更大。并在此基础上计算得出不同降水类型雷达反射率因子与降水强度的关系参数。

关键词 大气光学;雨滴谱;降水强度;雷达反射率因子;质量加权平均直径

中图分类号 P426.61⁺

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.120103

Summer Drop Size Distribution Characteristics in Beijing from Laser-Based Optical Disdrometer

Xu Wenjing¹ Su Debin¹ Qie Lili¹ Yu Liping² Xu Shiqing² Li Dong²

(¹Support Center for Atmospheric Observation Technique, Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089, China)

²Beijing Weather Observatory, Beijing 100176, China

Abstract Drop size distribution (DSD) observed at the ground depends on complex microphysical processes that progressively transform ice or water clouds particles aloft into rain below. DSD reflects the physics of rain and is the fundamental property for radar rainfall remote sensing, because it rules the relationship between the radar reflectivity factor Z and rainfall rate R . To better understand the microphysics of the summer precipitation, DSD measurements collected with Parsivel disdrometer are carried out at Beijing Weather Observatory in July to August 2007. The DSD characteristics and the relations among the radar reflectivity factor Z , rainfall rate R and mass-weighted mean diameter D_m are investigated. Specific Z - R relationship is derived for the whole data set.

Key words atmospheric optics; drop size distribution; rainfall rate; radar reflectivity factor; mass-weighted mean diameter

OCIS codes 010.3920; 290.2558; 280.4788

1 引言

水凝物粒子谱是在宏观大气运动和云内微观物理过程共同作用下形成的^[1,2],可分为云滴谱、冰晶谱、雨滴谱(DSD)等。其中雨滴谱是云及降水物理学中重要的研究对象,同时也是雷达气象学的核心问题,反映了雷达反射率因子 Z 与降水强度 R 的关系。研究雨滴谱特性不仅能够提高雷达定量估测降水精度^[3,4],同时有助于理解降水系统中复杂的微物理过程^[1,5,6],研究结果在气象、水文等领域有着广泛的应用价值。

早期研究者普遍采用滤纸进行雨滴谱观测。Marshall 等^[7]在 1948 年根据滤纸法所测数据得出著名的降水粒子谱 M-P 分布模型。其观测方法是通过测量滤纸上各种雨滴印记的大小来确定地面雨滴实际直径,

收稿日期: 2012-09-29; 收到修改稿日期: 2012-10-10; 网络出版日期: 2012-11-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40930949)和中国气象局关键技术集成与应用项目(CAMGJ2012M01)资助课题。

作者简介: 徐文静(1973—),女,硕士,工程师,主要从事大气探测技术方面的研究。E-mail: xwening@bjmb.gov.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

这种测量方法误差较大,劳动强度高,不适合大量数据采样及分析。1967年 Joss 等^[8]设计出根据雨滴撞击传感器垂直冲击力测量雨滴大小的雨滴测量器。刘红燕等^[9]曾利用声雨滴谱仪器对北京 2004 年降水进行观测,分析不同降水过程的 Z-R 关系。随着激光技术的迅速发展,研制出基于激光散射原理的粒子探测器,能够有效探测降水粒子的微物理信息^[10,11],如美国 PMS 公司生产的粒子测量系统和德国 OTT 公司研制的 Parsivel 激光降水粒子谱测量系统。Chen 等^[12]利用 Parsivel 激光降水粒子谱测量系统对 2008 年 1 月华南地区冻雨进行观测,分析该地区冻雨的雨滴谱特性。

北京夏季暴雨频繁,降水量可达全年总和的 70%,分析北京夏季降水雨滴谱特征对改善北京地区雷达降水定量估计、辅助人工影响天气作业、改善云物理模式从而提高数值预报能力都有重要意义。为提高雷达定量降水估测准确性,基于世界气象组织天气研究计划北京 2008 年奥运会天气预报示范和研究预报示范项目,北京市气象局与加拿大气象局合作引进德国 OTT 公司的 Parsivel 降水粒子谱仪,于 2007 年 7 月开展北京夏季降水联合观测实验,实验地点位于北京市南郊的北京市观象台(东经 116°28'10",北纬 39°48'22")。本文利用 Parsivel 激光降水粒子谱仪对北京 2007 年夏季降水进行观测,分析不同降水类型的雨滴谱特征,并拟合降水雷达反射率因子与降水强度之间的关系参数,同时探讨地面风速对降水粒子特征直径的影响。

2 Parsivel 降水粒子谱仪

Parsivel 降水粒子谱仪是一种激光前散射式光学遥测传感器,通过测量降水粒子直径与速度得到雨滴谱。具体测量原理是:当降水粒子穿过水平射出的激光束时,接收器接收到的激光光强会因雨滴的衰减作用而降低(Parsivel 所发射的激光光束中心波长为 650 nm,雨滴的衰减作用主要由散射决定^[13~15]),从而输出电压会改变,根据输出电压的改变量可确定降水粒子的直径,根据电子信号的持续时间可推得粒子的下降速度。由降水粒子直径、下降速度可导出降水粒子谱参数。

Parsivel 降水粒子谱仪可同时获取各通道粒子尺度与粒子速度的二维数据,有 32 个粒子直径测量通道,对应的粒子直径有效观测范围是 0.2~5.0 mm(液体粒子)和 0.2~25.0 mm(固态粒子);另有 32 个粒子速度测量通道,对应的粒子速度有效观测范围是 0.2~20.0 m/s。

3 资料选取与数据处理

3.1 资料选取

选取 2007 年 7 月 27 日至 8 月 26 日观测资料共 13 次降水过程。观测资料包括 Parsivel 降水粒子谱仪观测到的降水粒子直径谱、降水粒子速度谱以及地面自动气象站(AWS)在同一地点同步观测到的距离地面 10 m 高度的风速观测值。Parsivel 与 AWS 观测时间分辨率均为 1 min。

地面天气现象观测资料显示,观测期间未出现过冰雹等固态降水,因此对超出液态粒子直径范围的观测记录予以剔除,即滤除降水粒子直径小于 0.2 mm 和大于 5 mm 的观测记录。地面自动气象站为人工值守站,数据经过界限值检测、一致性检测等数据质量控制处理,数据质量可靠,因此仅对缺测记录做剔除处理。

3.2 雨滴谱计算

雨滴直径分布情况通常由概率密度分布函数来描述,可表示为 M-P 分布、Gamma 分布^[16]等形式。M-P 分布表达式为

$$N(D) = N_0 \exp(-\Delta D), \quad (1)$$

式中 D 为雨滴直径, N_0 为浓度因子, Δ 为尺度因子。众多实验表明,在不同条件下所得 N_0 和 Δ 变化非常大。

Parsivel 观测到的第 i 个粒径通道的雨滴单位尺度空间数密度(以下简称雨滴数浓度),可计算为

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{32} \frac{n_{ij}}{A \cdot \Delta t \cdot \Delta D_i}, \quad (2)$$

式中 n_{ij} 为在第 i 个粒径通道和第 j 个速度通道的雨滴个数, A 和 Δt 分别为取样面积和时间。

雨滴谱尺度因子 Δ 与雨滴谱中值体积直径 D_0 有关, D_0 定义为含水量贡献值的一半由小于 D_0 的雨滴组成。研究表明雨滴谱质量加权平均直径 D_m 非常接近 D_0 , 可以作为 D_0 的估计值^[16]。 D_m 可计算为

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

在不考虑风对雨滴影响的前提下,由雨滴谱计算降水强度 R 的公式定义为^[4]

$$R = 6\pi \times 10^{-4} \int_0^{\infty} D^3 v(D) N(D) dD \quad (4)$$

之前的研究由于缺乏雨滴下落速度谱观测值,研究者往往采用雨滴直径与下落速度之间关系的经验公式来估算雨滴速度谱 $v(D)$ ^[4]。Parsivel 能够同时获取雨滴大小和相应的下落速度,因此本文采取 Parsivel 实际测得的雨滴下落速度谱来计算降水强度。

Battan^[17]于1973年提出的雷达反射率因子与雨滴谱关系表达式为

$$Z = \int_0^{\infty} D^6 N(D) dD \quad (5)$$

而 Z 通常用 dB Z ($\text{dB } Z = 10 \lg Z$) 表示。

本文采用(1)~(5)式计算雨滴数浓度 $N(D)$ 和质量加权平均直径 D_m , 导出降水物理量 R 和 Z , 对实际观测雨滴谱进行 M-P 谱分布拟合, 进而分析北京 2007 年夏季降水雨滴谱特征。

4 观测结果与分析

参照 Testud 等^[18]提出的降水云系类型划分标准,定义当前时刻前后 5 min 内降水强度 R 均小于 10 mm/h 时为层云降水类型,否则为对流云降水类型,据此 2007 年 7 月 27 日至 8 月 26 日的 13 次降水过程共有 9 次层云降水和 4 次对流云降水。表 1 给出了降水类型划分结果及其雨滴谱特征微物理量计算结果,包括质量加权平均直径 D_m 、最大直径 D_{\max} 和降水强度 R , 并统计小雨滴(直径在 0.2~1.5 mm 之间)个数和大雨滴(直径大于 2.0 mm)个数各占雨滴总个数的百分比($N_{<1.5}/N$ 和 $N_{>2}/N$)。利用(1)式基于最小二乘法对这两种降水类型观测资料分别进行 M-P 谱分布拟合,得出对流云降水和层云降水的 M-P 谱分布参数 N_0, Δ (表 2)。表 2 同时给出了两种降水类型的雨滴谱特征量平均值。

表 1 13 次降水过程的雨滴谱特征量

Table 1 DSD parameters for days and times indicated

No.	Local time	Type	D_m/mm	D_{\max}/mm	$(N_{<1.5}/N) / \%$	$(N_{>2}/N) / \%$	$R / (\text{mm/h})$
1	07-27 19:55~22:08	S	1.39	4.75	87.1	0.8	2.7
2	07-30 07:57~09:13	C	1.59	4.75	73.9	7.9	11.6
3	07-30 10:38~13:16	S	1.57	4.75	74.4	3.7	1.47
4	07-30 13:58~21:01	C	1.49	4.75	81.0	3.8	6.53
5	07-31 14:15~17:23	S	1.41	4.75	83.2	2.2	1.06
6	08-01 13:15~15:29	C	2.17	4.75	71.8	9.9	20.26
7	08-05 01:08~01:49	S	0.88	2.75	98.6	0.1	0.35
8	08-07 04:30~08:26	S	1.16	4.75	86.4	1.3	2.18
9	08-12 00:29~02:03	C	1.92	4.75	72.7	8.8	32.95
10	08-12 13:34~14:15	S	1.55	4.75	71.8	8.3	4.98
11	08-15 21:54~23:53	S	0.84	3.75	98.3	0.1	0.17
12	08-16 00:13~02:41	S	0.90	2.12	98.1	0.0	0.07
13	08-25 18:18~08-26 08:00	S	1.01	4.25	94.0	0.2	1.01

S stands for stratiform and C for convective.

表 2 两种降水类型雨滴谱特征量平均值以及 M-P 谱分布拟合结果

Table 2 Mean DSD parameters and N_0 , Λ in different types

Type	D_m /mm	D_{max} /mm	$(N_{<1.5}/N) / \%$	$(N_{>2}/N) / \%$	$R / (\text{mm}/\text{h})$	N_0	Λ
C	1.69	4.75	76.0	6.9	13.2	666.4	1.1
S	1.13	4.07	89.6	1.0	1.29	193.7	1.2

由表 1 和表 2 可以看出,无论是对流云降水类型还是层云降水类型,小雨滴对雨滴数浓度贡献值更大,每次降水过程中小雨滴均占雨滴总数 70% 以上,其中对流云降水平均占 76.0%,层云降水平均占 89.6%。4 次对流云降水 $D_{max} = 4.75$ mm,而 9 次层云降水有 3 次 $D_{max} < 4$ mm。对流云降水类型平均 $D_m = 1.69$ mm,平均 $D_{max} = 4.75$ mm,平均 $N_{>2}/N = 6.9\%$,均大于层云降水类型的相应值(1.13 mm、4.07 mm、1.0%),表明对流云降水雨滴 D_m 与 D_{max} 更大、大雨滴所占比例更大,这些雨滴谱微物理参量导致对流云降水平均降水强度 13.2 mm/h 远大于层云降水 1.29 mm/h。

图 1 为两种降水类型(4 次对流云降水、9 次层云降水)的实际观测雨滴谱、观测值取平均后的平均雨滴谱以及基于平均值的 M-P 谱分布拟合结果。从图 1 可见两种降水类型小雨滴对于雨滴数浓度的贡献比大雨滴的大,对比图 1(a)和图 1(b)还可以发现对流云降水比层云降水雨滴数浓度更大,谱宽更宽。对比平均雨滴谱与拟合的 M-P 谱分布可以看出,二者在雨滴中间区段比较接近,而在小雨滴和大雨滴段存在一定差异,M-P 谱分布高估小雨滴数浓度而低估大雨滴数浓度。具体 M-P 谱函数参数拟合值如表 2 所示。

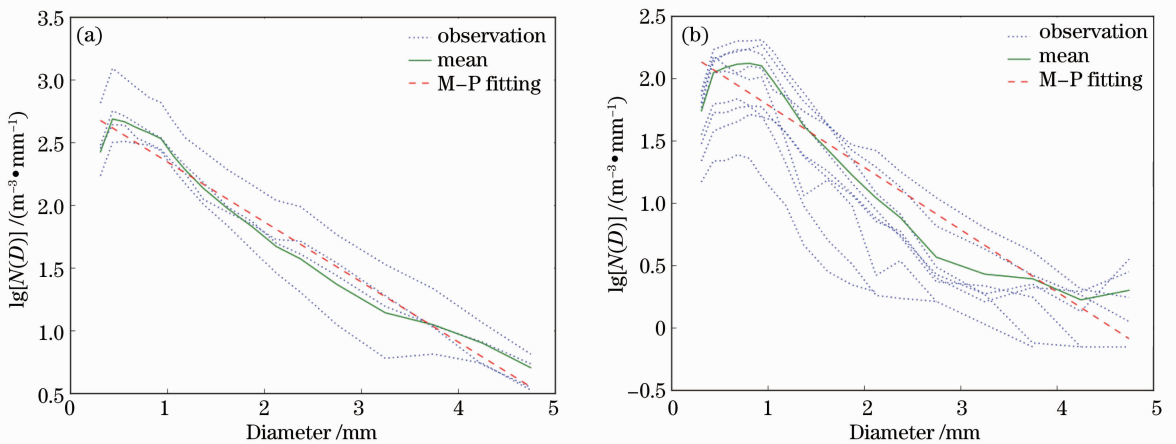


图 1 实际观测雨滴谱、平均雨滴谱和 M-P 分布的拟合谱。(a) 对流云降水;(b) 层云降水

Fig. 1 DSD observation, mean DSD and M-P fitting $\lg[N(D)]$ against diameter. (a) Convective; (b) stratiform

选取 2007 年 8 月 1 日 13:15~15:30 和 8 月 25 日 18:15 至 8 月 26 日 08:00 两次降水过程进行个例分析。图 2 为 8 月 1 日降水过程中 $N(D)$ 和 D_{max} 的时序变化(图底空白是因为滤掉了粒子直径小于 0.2 mm 的降水粒子),图 3 是在相应时间段内 D_m 、 Z 、 R 以及地面风速随时间变化的情况。图 4 和图 5 对应 8 月 25 日的降水过程。

8 月 1 日(对流云降水,表 1)降水过程持续 2 h,从图 2 和图 3 可以看出降水过程可明显分为 3 个阶段。第 1 阶段 13:15~14:07,第 2 阶段 14:15~14:35,第 3 阶段 14:40~15:00。整个降水过程粒子谱宽变化相对较大,雨滴直径主要集中于 0.2~1.6 mm,在第 2、3 阶段 D_{max} 均超过 4.0 mm, $N(D)$ 在 $800 \sim 1200 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ 以上,最大值出现在第 3 阶段,达到 $2800 \sim 3500 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$,相对应的雨滴直径在 0.3~0.5 mm 之间。

8 月 25~26 日(层云降水,表 1)降水过程持续近 14 h。从图 4 和图 5 可以看出整个降水过程可明显分为 5 个阶段,第 1 阶段 18:15~22:00,第 2 阶段 22:00~23:30,第 3 阶段 00:30~03:00,第 4 阶段 03:30~06:00,第 5 阶段 06:30~07:45。整个降水过程粒子谱宽变化相对较小,雨滴直径主要集中于 0.2~1.5 mm,第 3 阶段出现 1 个 $D_{max} > 4$ mm 的大雨滴,其他阶段 $D_{max} \leq 3.5$ mm, $N(D)$ 最大值出现在第 3 阶段前期,达到 $750 \sim 900 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$,相对应的雨滴直径在 0.5~1.0 mm 之间。

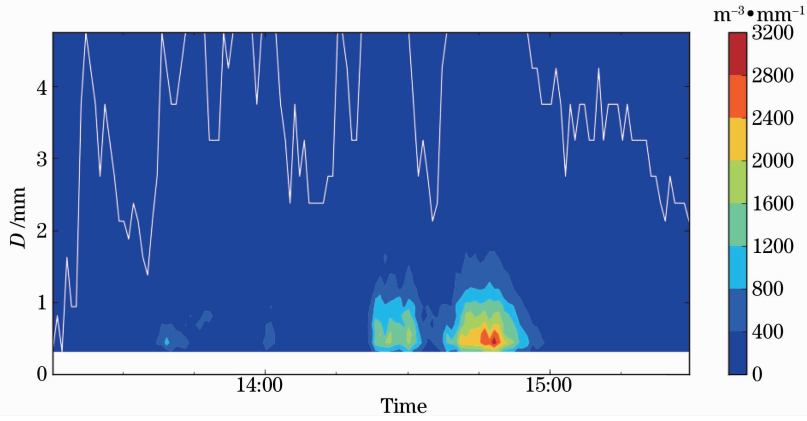


图2 2007年8月1日13:15~15:30雨滴数浓度 $N(D)$ 时序变化,白色实线表示降水粒子的最大直径 D_{\max}
 Fig. 2 Time series of number concentration $N(D)$, August 1, 2007. The solid white line is the raindrop maximum diameter D_{\max}

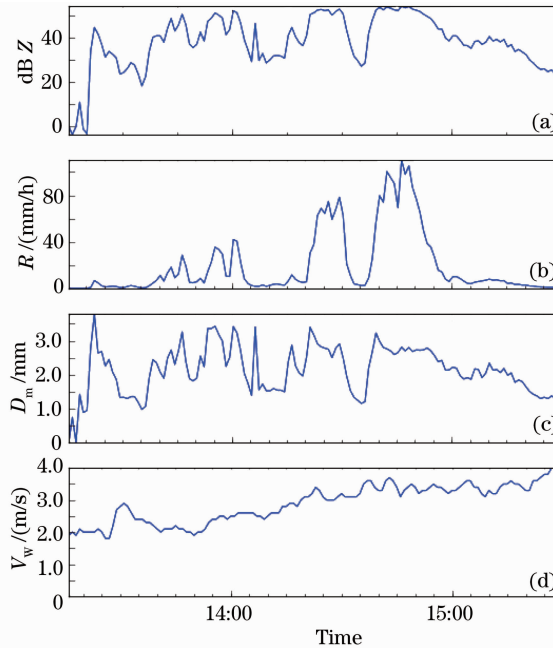


图3 2007年8月1日13:15~15:30雨滴谱参量及风速随时间变化。(a)雷达反射率因子 Z (dB Z);(b)降水强度 R ;
 (c)雨滴质量加权平均直径 D_m ;(d)地面风速
 Fig. 3 Time series of DSD parameters, August 1, 2007. (a) Radar reflectivity factor Z (dB Z); (b) rain rate R ;
 (c) mass-weighted mean diameter D_m ; (d) surface wind speed V_w

8月1日 D_{\max} 与 $N(D)$ 均远高于8月25~26日,由(2)式和(3)式可知降水强度 R 与雨滴直径的3次方成正比,雷达反射率因子 Z 与雨滴直径的6次方成正比,这解释了8月1日的 R 和dB Z 远高于8月25~26日的 R 和dB Z 的原因。由图3和图5可知,这两场降水过程中地面风速对降水强度和雨滴质量加权平均直径的影响不大。

由(4)式和(5)式可推出 $Z-R$ 关系为^[3,4]

$$Z = aR^b, \quad (6)$$

式中 a, b 为待定参数。通过建立 $Z-R$ 关系可以利用雷达定量估测降水量,具有重要的应用价值,然而由于 $Z-R$ 关系随不同时间和空间而变化,且与降水成因及降水云系类型等因素有关,因此引用不变的 $Z-R$ 关系会导致降水量被错误估计^[19]。

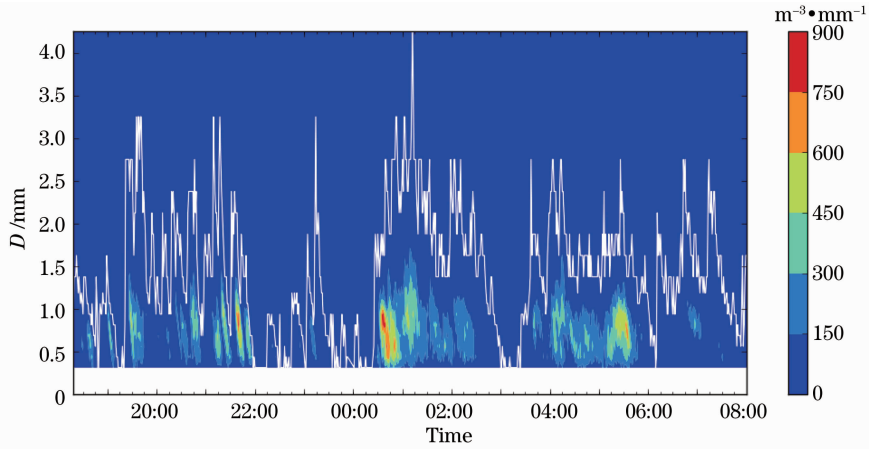


图4 2007年8月25日18:15至26日08:00雨滴数浓度 $N(D)$ 时序变化,白色实线表示降水粒子的最大直径 D_{\max}
Fig. 4 Time series of number concentration $N(D)$, August 25~26, 2007. The solid white line is the raindrop D_{\max}

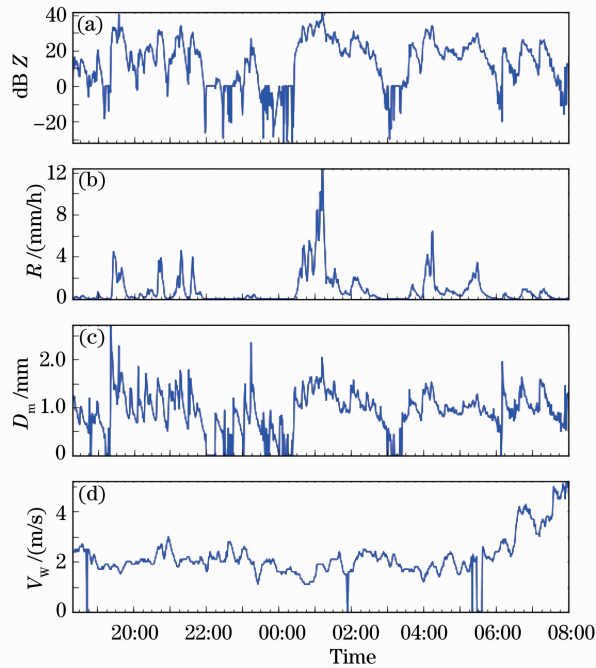


图5 2007年8月25日18:15至26日08:00雨滴谱参量及风速随时间变化。(a)雷达反射率因子 Z (dB Z);(b)降水强度 R ;(c)雨滴质量加权平均直径 D_m ;(d)地面风速 V_w
Fig. 5 Time series of DSD parameters, August 25~26, 2007. (a) Radar reflectivity factor Z (dB Z); (b) rain rate R ; (c) mass-weighted mean diameter D_m ; (d) surface wind speed V_w

通过对(6)式等号两边同时取对数可将 $Z-R$ 指数关系转换成 $\text{dB } Z$ 与 $\lg R$ 的线性关系式,采用最小二乘法进行线性拟合即可得到 $Z-R$ 关系中的参数 a 和 b 。本文基于由两种降水类型(9次层云,4次对流云)雨滴谱观测数据计算得到的 Z 、 R 值进行拟合,得到 $a=380.44, b=1.43$ (对流云降水类型)以及 $a=299.55, b=1.39$ (层云降水类型)。图6反映的是不同降水类型中降水强度(R)与雷达发射率因子($\text{dB } Z$)的关系,可以看出 $\lg R$ 与 $\text{dB } Z$ 之间存在明显的线性关系,相关系数分别为0.98(对流云降水类型)和0.97(层云降水类型)。

5 结 论

利用 Parsivel 降水粒子谱仪对 2007 年北京夏季 13 次降水过程进行观测,分析不同降水类型的雨滴谱

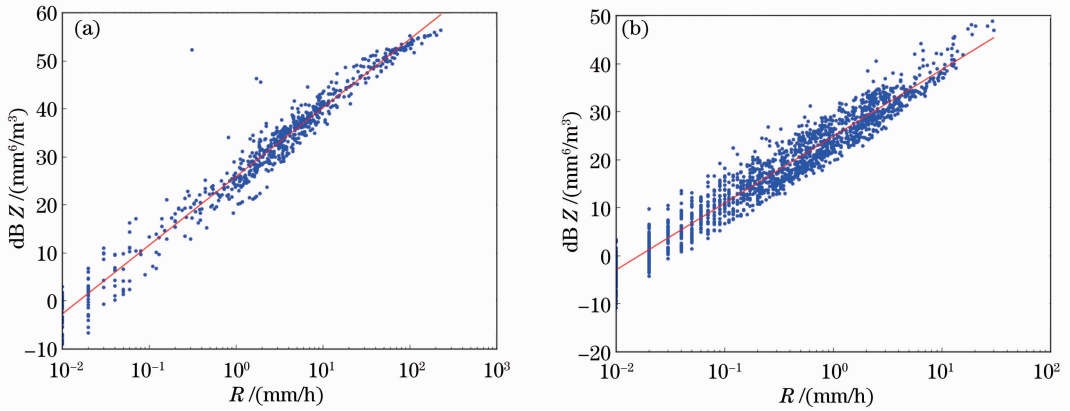


图6 雷达反射率因子 dB Z 与降水强度 R 的对应关系(圆点)以及线性拟合(实线)。(a)对流云降水; (b)层云降水
Fig. 6 Z-R relation obtained from prasilvel. (a) Convective; (b) stratiform

特征,并在此基础上计算得出不同降水类型雷达反射率因子与降水强度的关系参数。结果表明:

1) 无论是层云降水类型还是对流云降水类型,小雨滴(直径在 0.2~1.5 mm 之间)对雨滴数浓度的贡献比大雨滴(直径超过 2.0 mm)大,每次降水过程中小雨滴均占雨滴总数 70% 以上,在对流云降水中小雨滴平均占 76.0%,大雨滴平均占 6.9%,在层云降水中小雨滴平均占 89.6%,大雨滴平均占 1.0%。对流云降水类型与层云降水类型相比雨滴谱更宽, D_m 、 D_{max} 和雨滴数浓度更大,这与对流云上升气流比层云旺盛,导致水凝物碰撞且持续时间更长有关。分别对两种降水类型的雨滴谱观测数据进行 M-P 谱分布拟合,结果显示 M-P 谱分布与观测值平均谱比较接近,但 M-P 谱分布高估了小雨滴数浓度而低估了大雨滴数浓度。

2) 基于北京地区夏季 13 次降水观测数据对两种降水类型进行 Z-R 关系拟合,得到参数拟合值为 $a = 380.44, b = 1.43$ (对流云降水类型),相关系数 $r = 0.98$; $a = 299.55, b = 1.39$,相关系数为 0.97 (层云降水类型)。Z-R 关系具有不确定性,不同地区、不同季节以及不同降水类型均有所不同,因此采用具体的 Z-R 关系参数有助于提高当地雷达定量估测降水精度。

3) 本文所得结果是基于北京市南部地区的雨滴谱观测数据,为了获取北京地区更为全面的雨滴谱特征,需要选取多个有代表性的地点(如在北京西北部山区和平原地区)开展对比观测,并结合其他观测资料对观测结果进行验证,开展更为深入的研究。

参 考 文 献

- 1 B. Radhakrishna, T. Narayana Rao, D. Narayana Rao *et al.*. Spatial and seasonal variability of raindrop size distributions in southeast India. [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**: D04203
- 2 Tomoki Ushiyama, K. Krishna Reddy, Hisayuki Kubota *et al.*. Diurnal to interannual variation in the raindrop size distribution over Palau in the western tropical Pacific [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**: L02810
- 3 Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi. Radar Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001. 171~181
张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2001. 171~181
- 4 Richard J. Doviak, Dusan S. Zrnica. Doppler Radar and Weather Observation[M]. New York: Dover Publications, 2006. 210~222
- 5 Sounmaila Moumouni, Marielle Gosset, Etienne Houngrinou. Main features of the rain drop size distributions observed in Benin, West Africa, with optical disdrometers [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, **35**: L23807
- 6 David Atlas, Carlton W. Ulbrich, Frank D. Marks Jr. *et al.*. Systematic variation of drop size and radar-rainfall relations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(D6): 6155~6169
- 7 J. S. Marshall, W. M. Palmer. The distribution of raindrops with size [J]. *J. Meteor.*, 1948, **5**(4): 165~166
- 8 J. Joss, A. Walvogel. A spectrograph for automatic measurement of rainfall [J]. *Geofis. Pura Appl.*, 1967, **68**: 240~246
- 9 Liu Hongyan, Chen Hongbin, Lei Hengchi *et al.*. Relationship between rain rate and radar reflectivity base on the raindrop distribution data in Beijing during 2004 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, **66**(1): 125~129

- 刘红燕, 陈洪滨, 雷恒池 等. 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, 2008, **66**(1): 125~129
- 10 Wu Wei, Qin Shiqiao, Huang Zhuqing. A fast inversion method for water droplet size determination in scattering light measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0712008
- 吴 伟, 秦石乔, 黄竹青. 水滴粒径散射测量中的快速反演方法研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(7): 0712008
- 11 Bu Lingbing, Wang Min, Huang Xingyou *et al.*. Study of cloud droplet probe and its calibration. [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0808005
- 卜令兵, 王 敏, 黄兴友 等. 云粒子探测器及其标定研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(8): 0808005
- 12 Baojun Chen, Wen Hu, Jiangping Pu. Characteristics of the raindrop size distribution for freezing precipitation observed in southern China [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**: D06201
- 13 Guo Jing, Zhang He, Wang Xiaofeng. Attenuation and transmission of laser radiation at 532 nm and 1064 nm through rain. [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0101004
- 郭 婧, 张 合, 王晓锋. 降雨对 532 nm 和 1064 nm 激光传输的衰减特性研究 [J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0101004
- 14 Liu Min, Wang Hongxing, Wang Qian *et al.*. A revision model of the calculation of atmospheric attenuation in water fogs weather[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1005002
- 刘 敏, 王红星, 王 倩 等. 雨雾共存天气下大气衰减计算的修正模型[J]. 中国激光, 2011, **38**(10):1005002
- 15 Sun Xianming, Wang Haihua, Shen Jin. Study on light backscattering by spheroid with inclusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0829001
- 孙贤明, 王海华, 申 晋. 含核椭球粒子后向散射特性研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0829001
- 16 C. W. Ulbrich. Natural variation in the analytical form of the raindrop size distribution [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1983, **22**(10): 1764~1775
- 17 L. J. Battan. Radar Observation of the Atmosphere[M]. Chicago: The University of Chicago Press, 1973
- 18 Jacques Testud, Stephane Qury. The concept of “normalized” distribution to describe raindrop spectra: a tool for cloud physics and cloud remote sensing [J]. *J. Appl. Meteor.*, 2001, **40**(6): 1118~1140
- 19 Remko Uijlenhoet, Matthias Steiner, James A. Smith. Variability of raindrop size distributions in a squall line and implications for radar rainfall estimation [J]. *J. Hydrometeor.*, 2003, **4**(1): 43~61