

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^{* 1}

刘红燕¹ 陈洪滨¹ 雷恒池² 吴玉霞²

LIU Hongyan¹ CHEN Hongbin¹ LEI Hengchi² WU Yuxia²

1. 中国科学院大气物理研究所中层大气与探测开放实验室(LAGEO),北京,100029

2. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室(LACS),北京,100029

1. Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2007-03-11 收稿,2007-05-10 改回.

Liu Hongyan, Chen Hongbin, Lei Hengchi, Wu Yuxia. 2008. Relationship between rain rate and radar reflectivity based on the raindrop distribution data in Beijing during 2004. Acta Meteorologica Sinica, 66(1):125-129

Abstract The rain rate R and radar reflectivity factor Z were calculated based on the raindrop size distribution data of 45 precipitation events measured in Beijing during 2004 by a Disdrometer, which has 20 channels and measures the raindrop diameter from 0.35 mm to 5.0 mm. For different precipitating clouds, the relationships between R and Z , or coefficient a and exponent b , are quite different, that maybe attribute to different raindrop size distributions. At the same time, the Z - R relationship over land is also different from that over the sea. There is a positive correlation between a and b in these 45 events of precipitation. The relationship between coefficient a (or exponent b) and some physical quantities, such as rain rate R , radar reflectivity factor Z , characteristic diameter D_m and raindrop number density N_T is analyzed, respectively. When $R < 5$ mm/h, or $N_T < 1000$ m⁻³, or $Z < 2000$ mm⁶/m³, coefficient a (or exponent b) changes greatly, and when R , or N_T , or Z gradually increases, coefficient a (or the exponent b) approaches to a constant value. Both coefficient a and exponent b decreased from April to December in 2004. Moreover, the characteristics of D_m derived from the raindrop size distribution data of 12 precipitations are analyzed, and the results show that there is a linear correlation between R and Z , in other words, exponent b is 1, when D_m is a constant.

Key words Disdrometer, Raindrop distribution, Rain rate, Radar reflectivity factor

摘 要 在北京 2004 年的 45 次降水过程中,基于 DISDROMETER 仪器测量的雨滴谱资料计算每次降水的强度 R 和雷达反射率因子 Z 。结果表明,不同降水过程中,雷达反射率因子 Z 与降水强度 R 的幂指数关系中的指数 b 和系数 a 是不同的,这与不同降水过程的雨滴谱分布不同密切相关。综合分析这 45 次降水过程中的指数 b 和系数 a ,得到指数 b 和系数 a 呈正相关。接着,分别就指数 b 和系数 a 与平均降水强度、平均雷达反射率因子、平均特征直径和雨滴平均数密度之间关系做了详细的讨论。另外,基于这一年的降水雨滴谱资料,讨论了 Z - R 幂指数关系中指数 b 和系数 a 的月变化特征。分析结果表明,从 4 月到 12 月系数 a 和指数 b 呈现逐月递减的年变化特征。最后,文章就 12 个个例的特征直径 D_m 的特征进行了分析。结果显示,当特征直径 D_m 随时间保持不变时,降水强度 R 和雷达反射率因子 Z 之间存在线性相关的关系,即当特征直径 D_m 为常数时, Z - R 关系的指数 b 为 1。

关键词 DISDROMETER 雨滴谱仪, 降水强度, 雷达反射率因子, 指数关系, 特征直径

中图法分类号 P426

* 资助课题:973 项目“空间微波遥感地海表和大气数据验证”课题(2001CB309402)和国家基金委项目(40428006 和 40227001)。

作者简介:刘红燕,研究方向:云雾物理。E-mail:hyliu@ium.cn

1 引言

降水强度 R 与雷达反射率因子 Z 的关系是雷达定量测量降水的基础, $Z-R$ 关系的不确定性是雷达测量降水的主要误差来源。在以往的研究 (Marshall, 1969; Battan, 1976; Wilson 等, 1979; Austin, 1987; Uijlenhoet, 2001) 中得到降水强度 R 和雷达反射率因子 Z 之间存在幂指数关系

$$Z = aR^b \quad (1)$$

Stout 等 (1968) 和 Cataneo 等 (1968) 研究了对于不同降水类型、不同天气形势、不同热力条件时的 $Z-R$ 关系。最近在 Rosenfeld 等 (2003) 的研究中讨论了海洋与陆地、对流云与层状云、以及山地地形云降水的 $Z-R$ 关系, 分析 $Z-R$ 关系中系数和指数的特征。通过雨滴谱资料建立 $Z-R$ 关系是比较容易的事情, 但是反过来从 $Z-R$ 关系来解释降水的微物理意义是比较困难的事情。因为在对雨滴谱的观测中发现, 不论是不同降水还是同一降水的不同时间, 雨滴谱都有明显的变化, 这就意味着 $Z-R$ 关系的系数和指数会发生较大的变化。同时统计得到的 $Z-R$ 关系中也存在着采样精度以及分析方法的局限性问题。这些都使对于 $Z-R$ 关系的微物理研究变得更加困难。本文的目的是讨论基于地面雨滴谱资料分析降水强度和雷达反射率因子之间关系。

研究使用北京 2004 年所有的降水雨滴谱资料, 对于每次降水过程建立了 $Z-R$ 关系, 分析 $Z-R$ 中系数 a 和指数 b 之间的关系。同时分别统计了系数 a 和指数 b 与平均降水强度、平均雷达反射率因子、平

均特征直径 D_m 和雨滴平均数密度之间关系。我们将降水按照月划分, 统计了北京从 5 月到 12 月降水的 $Z-R$ 关系。分析了 $Z-R$ 关系中系数 a 和指数 b 的月变化特征。最后根据测量得到的北京 2004 年所有降水雨滴谱资料建立了 $Z-R$ 关系。将 $Z-R$ 关系的系数 a 和指数 b 与 Rosenfeld 等 (2003) 提及的陆地、海洋值分别作了对比分析。同时在对 12 个个例分析中发现, 在降水过程中, 当特征直径 D_m 随时间不发生变化时, 降水强度 R 与雷达反射率因子 Z 之间存在线性关系。

2 仪器与数据分析方法介绍

2.1 仪器介绍

DISDROMETER 测雨仪是一种用来测量雨滴大小的仪器, 由 Joss 和 Waldvogel 于 1967 年设计完成, 根据雨滴撞击传感器的垂直冲力来测量雨滴的大小。它由 4 部分组成: 传感器、处理器、分析器和计算机。采样面积即传感器的表面积为 50 cm^2 。DISDROMETER 有 20 个通道, 每个通道对应某一雨滴直径范围 (表 1)。在强降水中, DISDROMETER 仪器会低估小雨滴的数目, 但是 Tokay 等 (1996) 的研究认为, DISDROMETER 对于小雨滴的低估, 对于 $Z-R$ 关系的影响不到 3%。

使用 DISDROMETER 测量了北京 2004 年所有降水过程的雨滴资料。DISDROMETER 放置在中国科学院大气物理研究所 12 层楼顶, 距地高度约 35 m。8 月 21 日以前, DISDROMETER 仪器采样时间为 4 min, 前 2 min 用于采集雨滴, 后 2 min 用

表 1 DISDROMETER 20 个通道对应的实际雨滴的直径范围和精度
Table 1 The diameter and precision of the 20 channels of DISDROMETER

通道号	雨滴直径 (mm)	雨滴直径的精度 (mm)	通道号	雨滴直径 (mm)	雨滴直径的精度 (mm)
1	0.35	0.05	11	1.95	0.15
2	0.45	0.05	12	2.25	0.15
3	0.55	0.05	13	2.55	0.15
4	0.65	0.05	14	2.85	0.15
5	0.75	0.05	15	3.15	0.15
6	0.90	0.10	16	3.50	0.20
7	1.10	0.10	17	3.90	0.20
8	1.30	0.10	18	4.30	0.20
9	1.50	0.10	19	4.75	0.25
10	1.70	0.10	20	5.00	0.25

于存储雨滴的采集信号。8 月 21 日以后,DISDROMETER 仪器采样时间为 2 min,前 1 min 用于采集雨滴,后 1 min 用于存储雨滴的采集信号。

在使用 DISDROMETER 测量降水时,我们做了它与雨滴谱试纸的同时观测实验。通过分析比较两种测量方法得到的雨滴谱分布以及降水强度和雷达反射率因子等,得出 DISDROMETER 与雨滴谱试纸之间存在较好的相关性。

2.2 数据分析方法

根据 DISDROMETER 测量的北京地区 2004 年 5—12 月的降水雨滴谱资料,使用下式计算雷达反射率因子 Z 和降水强度 R ,

$$R = \frac{\pi}{6} \times \frac{3.6}{10^3} \times \frac{1}{(St)} \sum_{i=1}^{20} n_i D_i^3 \quad (2)$$

$$Z = \frac{1}{(St)} \sum_{i=1}^{20} \frac{n_i}{V(D_i)} D_i^6 \quad (3)$$

其中 n_i 表示 DISDROMETER 第 i 个通道的雨滴数目, D_i 表示 DISDROMETER 第 i 个通道所对应的雨滴直径。 S 表示 DISDROMETER 的采样面积, t 为采样时间。 $V(D_i)$ 表示直径为 D_i 的雨滴降落末速度。我们使用了 Atlas 等(1973)建立的式(4)来计算直径为 D_i 的雨滴相应降落末速度 V 。即

$$V(D_i) = 9.65 - 10.3 \exp(-6D_i) \quad (4)$$

根据式(2)和式(3)可以计算出每组采样数据的降水强度 R 和雷达反射率因子 Z 。对每次降水过程,根据式(1)的形式,使用最小二乘法拟合出降水强度 R 和雷达反射率因子 Z 的回归关系。

同时引入单位空间体积中的雨滴总数目(平均数密度) $N_T(\text{m}^{-3})$ 和定义了雨滴的特征直径(质量权重直径) $D_m(\text{mm})$

$$N_T = \int_0^\infty N(D) dD = \frac{N_0}{\Lambda^{(1+\mu)}} \Gamma(1 + \mu) \quad (5)$$

$$D_m = \frac{\int_0^\infty N(D) D^4 dD}{\int_0^\infty N(D) D^3 dD} = \frac{4 + \mu}{\Lambda} \quad (6)$$

使用式(5)和式(6)可计算得到平均数密度 N_T ,雨滴的特征直径 D_m 。进而来讨论 N_T 、 D_m 与 Z - R 关系之间的联系。

3 Z-R 关系分析

3.1 Z-R 关系的系数 a 和指数 b

在使用 DISDROMETER 时,我们从 5 月的资

料开始,共取得 45 次降水雨滴谱。计算每次降水过程中每个采样样本得到的 $Z=aR^b$ 中的 a 、 b 和 Z 、 R 的相关系数,以及特征直径 D_m 和数密度 N_T 。从相关系数上看,有 11 次降水过程的相关系数低于 0.9,其余 34 次降水得到的 R 和 Z 的幂指数拟合相关系数都在 0.9 以上,最高为 0.998,其中 39 次相关显著水平 0.01,仅 6 次为 0.1—0.01,即降水强度 R 和雷达反射率因子 Z 之间呈幂指数关系。其中 a 的最大值为 534,出现在 2004 年 8 月 14 日 09:04 的降水中; a 的最小值为 35,出现在 2004 年 6 月 22 日 15:31 的降水中。 b 的最大值为 1.79,出现在 2004 年 8 月 21 日 11:47 的降水中; b 的最小值为 0.79,出现在 2004 年 6 月 21 日 00:12 的降水中。

将北京 2004 年所有的降水雨滴谱资料综合起来统计得到了这一年的 Z - R 关系,即为 $Z = 132R^{1.17}$ 。参考国内学者(邓雪娇等,1996;吴兑等,1989;周毓荃等,2001)所做的研究,比较了中国几个地区(广州、宁夏、吉林、安徽、江苏和湖南)的 Z - R 关系的系数和指数。北京的 Z - R 关系中的系数 a 和指数 b 都比其他地区低。即 Z - R 关系的系数和指数还与降水地点有关系,不同地区的值也是不同的。

我们将降水的雨滴谱资料按照月划分,分别用每个月中降水的所有雨滴谱资料计算降水强度 R 和雷达反射率因子 Z 。统计得到了北京 5—12 月 R 和 Z 的幂指数关系。从图 1 可以看出系数 a 和指数 b 随季节呈现出递减的趋势。其中指数 b 变化较弱,而系数 a 变化明显。但是,由于测量得到的数据只是北京 2004 年的情况, a 、 b 值的这种季节变化趋势在其他年份当中是否存在,还尚待研究。但是系数 a 和指数 b 的这种季节性变化特征,对认识降水的季节变化也许能够提供某种有用信息,对于雷达定量测量降水 Z - R 的关系选择有一定的参考价值。

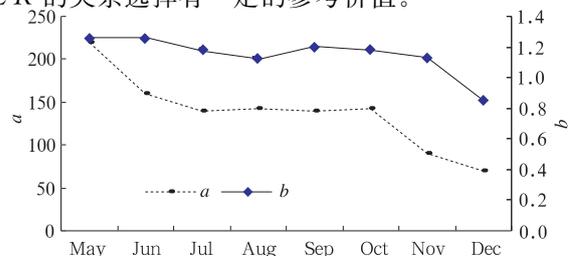


图 1 系数 a 与指数 b 的月变化
Fig. 1 Monthly variations of coefficient a and exponent b in Z - R relationship

3.2 系数 a 和指数 b 与其他物理量的关系

从微物理的角度去解释这些不同 Z - R 关系是非常困难的。这一方面涉及到降水的类型,还要考虑测量的缺陷以及分析方法的局限性。我们试图从 Z - R 关系的系数 a 、指数 b 与降水的其他物理量的关系,来探讨 Z - R 关系所表征的一些微物理含义。

对于每次降水由最小二乘法可以拟合得到 Z - R 关系的系数 a 和指数 b 。由每次降水中每个采样样本可以计算出降水强度 R 、雷达反射率因子 Z 、特征直径 D_m 和雨滴数密度 N_T 。对每次降水中这些量求平均值,得到平均 R 、平均 Z 、平均 D_m 和平均 N_T 。然后综合这 45 次降水的系数 a 和指数 b 与这些平均值,分别讨论系数 a 和指数 b 与这些平均值的关系。

3.2.1 系数 a 的特征分析

对于平均值 R (或者 Z 、或者 N_T),在值比较小时,系数 a 的变化范围比较大。在平均 $R < 5$ mm/h、或者平均 $Z < 2000$ mm⁶/m³、或者平均 $N_T < 1000$ m⁻³ 时,系数 a 的变化范围为 50—550。随着平均值 R (或者 Z 、或者 N_T) 增大,系数 a 的变化范围逐渐集中在某个范围之内。当平均值 $R > 5$ mm/h 或者平均值 $N_T > 1000$ m⁻³ 时,系数 a 逐渐集中在 100 附近。而当平均值 $Z > 2000$ mm⁶/m³ 时,系数 a 值逐渐集中在 300 附近。

随着平均 D_m 的增大,系数 a 值也变大同时它

的变化范围也在扩大。这说明系数 a 与雨滴谱的分布是有关联的。由此,我们也可以理解在不同降水中,或者是同一降水的不同时间内得到的降水强度 R 同雷达反射率因子 Z 之间的关系的不同,是因为系数 a 受到降水雨滴谱变化的影响而产生的。

3.2.2 指数 b 的特征分析

同系数 a 的特征相似,指数 b 在平均 $R < 5$ mm/h,或者平均 $N_T < 1000$ m⁻³ 或者平均 $Z < 2000$ mm⁶/m³ 时,变化范围比较大,为 0.79—1.79。而在平均 R (或者 Z 、或者 N_T) 逐渐增大时,指数 b 的变化比较小,基本保持稳定。指数 b 与平均 D_m 的关系中,除直径在 0.5—1 mm 出现一些偏离外,指数 b 与平均 D_m 有好的线性相关。与系数 a 不同的是,指数 b 随平均 D_m 增大而增大的值比较集中,离散度小。

3.3 陆地降水云和海洋降水云的系数 a 和指数 b

大多数情况下,降水云被分为陆地降水云和海洋降水云。其中海洋降水云中的大粒子浓度较小,为 50—100 个/cm³。而陆地降水云中包含的小粒子数浓度是海洋降水云的 10 倍。海洋云降水几乎是暖云降水,而陆地云降水中由于是碰并过程起主要作用,所以主要是冷云降水过程,包含有冰相。我们分别列出了几次陆地云降水和海洋云降水的 Z - R 关系的系数 a 和指数 b (表 2)。

表 2 陆地降水与海洋降水 Z - R 关系中的系数 a 和指数 b

Table 2 Coefficient a and exponent b in the Z - R relationship for maritime and continental precipitation

地点	降水云类型	a	b
瑞士(洛迦诺)	陆地	830	1.50
美国(伊利诺斯州)	陆地	446	1.43
美国(俄克拉荷马)	陆地	316	1.36
中国(北京 2004-08-14)	陆地	534	1.36
中国(北京平均)	陆地	132	1.17
波多黎哥	海洋	261	1.43
澳大利亚(达尔文)	海洋	232	1.38
澳大利亚(达尔文)	海洋	175	1.37
法国(马歇尔)	海洋	146	1.42

在比较陆地降水云同海洋降水云的 Z - R 关系时,我们得到的结果是 Z - R 关系的指数 b 是没有明显的差别。而对于系数 a ,陆地降水云的数值比海洋降水云大。

3.4 线性 Z - R 关系分析

在我们测量得到的降水雨滴谱资料中,选择了采样样本在 40 个以上(即降水时间超过 160 min)的降水过程进行分析。这样的降水在北京 2004 年

中共有 12 次。在每次降水过程中, D_m 值随时间是变化的。但在某些时间段内 D_m 的值变化较小,比较稳定。我们对这个时间段内的降水强度和雷达反射率因子关系作了分析。表 3 列出了这 12 次降水每次降水过程总的 Z - R 线性相关系数和每次降水过程中稳定的时间段内 Z - R 的线性相关系数。得到的分析结果表明,在 D_m 比较稳定时,降水强度 R 和雷达反射率 Z 因子线性关系非常明显。

表 3 Z-R 线性相关表
Table 3 Linear-correlations between rain rate and radar reflectivity when D_m is stable

降水时间(BST)	总的相关系数	D_m 稳定时间序列段	D_m 稳定时的相关系数
2004-09-30T17:21	0.6814	12—60	0.9379
2004-08-25T05:45	0.7558	1—9	0.9609
2004-08-25T05:45	0.7558	25—39	0.9346
2004-08-12T08:34	0.8487	41—59	0.9823
2004-08-12T08:34	0.8487	27—34	0.9132
2004-08-12T08:34	0.8487	10—22	0.9893
2004-07-26T07:50	0.8961	39—49	0.9771
2004-07-26T07:50	0.8961	20—27	0.9834
2004-07-26T07:50	0.8961	1—8	0.9226
2004-07-11T06:07	0.8714	4—10	0.9238
2004-07-11T06:07	0.8714	43—53	0.9958
2004-07-11T06:07	0.8714	55—65	0.9930
2004-06-30T11:24	0.7646	1—30	0.9513

4 结论与讨论

本文分析由北京 2004 年的降水雨滴谱资料计算得到的降水强度和雷达反射率因子之间的函数关系,得到以下几点结论。

(1) 不同降水有不同的 Z-R 关系。这是由于不同降水的雨滴谱分布不同。同时,在不同地区的 Z-R 关系也是不同的。

(2) Z-R 关系呈幂指数形式,我们按月份统计了 Z-R 关系中的系数 a 和指数 b ,分析它们的月变化特征,结果系数 a 和指数 b 有逐步递减的月变化特征。

(3) 在分析 Z-R 关系中的系数 a 和指数 b 与其他物理量(平均 R 、平均 Z 、平均 N_T 和平均 D_m)的关系时,得到系数 a (指数 b) 在平均 $R < 5$ mm/h,或者平均 $N_T < 1000$ m^{-3} 或者平均 $Z < 2000$ mm^6/m^3 时,变化范围较大。而当平均 R 、平均 Z 、平均 N_T 逐渐增大时,系数 a (指数 b) 开始趋于稳定。同时系数 a (指数 b) 与平均 D_m 呈正相关,而系数 a 和指数 b 存在正相关的关系。

(4) 我们对 12 个个例做了在 D_m 变化稳定时,降水强度和雷达反射率因子之间关系的分析研究。结果表明, D_m 稳定时,降水强度和雷达反射率因子呈线性关系。

但是由于目前测量技术和分析方法的限制,我们对于降水强度和雷达反射率因子之间的回归关系的物理解释还不够,这有待于进一步的创新研究。

References

Atlas D, Srivastava R C, Sekon R S. 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Rec Geophys*, 11: 1-35
Austin P M. 1987. Relation between measured radar reflectivity and

surface rainfall. *Mon Wea Rev*, 115: 1053-1070
Battan L J. 1976. Vertical air motions and the Z-R relation. *J Appl Meteor*, 15: 1120-1121
Cataneo R, Stout G E. 1968. Raindrop-size distributions in humid continental climates, and associated rainfall rate-radar reflectivity relationships. *J Appl Meteor*, 7: 901-907
Deng X J, Huang H H, Wu D. 1996. The Micro-features of heavy rain over Guangzhou area in rainy season. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 12(2): 167-173
Marshall J S. 1969. Power-law relations in radar meteorology. *J Appl Meteor*, 8: 171-172
Rosenfeld D, Ulbrich C W. 2003. Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities. *Radar and Atmospheric Science: A Collection of Essays in Honor of David Atlas*, Meteor Monogr, No 52, Amer Meteor Soc, 237-258
Stout G E, Mueller E A. 1968. Survey of relationships between rainfall rate and radar reflectivity in the measurement of precipitation. *J Appl Meteor*, 7: 465-474
Tokay A, Short D A. 1996. Evidence from tropical raindrop spectra of the origin of rain from stratiform versus convective clouds. *J Appl Meteorol*, 35:355-371
Uijlenhoet R. 2001. Raindrop size distributions and radar reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology. *Hydrol Earth Syst Sci*, 5: 615-627
Wilson J W, Brandes E A. 1979. Radar measurement of rainfall-A summary. *Bull Amer Meteor Soc*, 60:1048-1058
Wu D, Liu Y Z. 1989. A study on Z-I relationship in different types of rain over Ningxia Plain. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 15(2):22-26
Zhou Y Q, Liu X T, Zhou F F. 2001. Characteristics of surface raindrop spectra in drought years in Henan province. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 12: 39-47

附中文参考文献

邓雪娇,黄浩辉,吴兑. 1996. 广州地区汛期降水的微物理特征. *热带气象学报*,12(2):167-173
吴兑,刘永政. 1989. 宁夏平原不同雨型的 Z-I 关系研究. *气象*,15(2):22-26
周毓荃,刘晓天,周非非等. 2001. 河南干旱年地面雨滴谱特征. *应用气象学报*,12: 39-47