

贾星灿, 牛生杰. 空中、地面雨滴谱特征的观测分析 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(6): 865-870

空中、地面雨滴谱特征的观测分析

贾星灿, 牛生杰

(南京信息工程大学 中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室, 江苏 南京 210044)

摘要: 利用 1982 年 7 月 9 日宁夏银川站的一次层状云降水过程中地面、空中观测的雨滴谱资料, 分析了宁夏地区层状云降水过程中地面、空中的雨滴谱特征, 并对地面和空中雨滴谱进行对比。结果表明: 地面雨滴谱以指数型为主 (61.9%), 空中雨滴谱以多峰型为主 (86.4%); 对于空中、地面雨滴平均谱, Gamma 分布拟合的相关系数更高; 地面雨滴谱中小滴较多, 空中雨滴谱中大滴较多, 可能受到碰并、蒸发、破碎的共同影响。研究地面雷达反射率因子 Z 、雨水含量 W 、雨滴数浓度 N 与雨强 I 的关系, $Z-I$ 关系和 $W-I$ 关系的相关性很好, 而 $N-I$ 、 N_0-I 、 $\lambda-I$ 关系的相关性不是很好。

关键词: 地面雨滴谱; 空中雨滴谱; 层状云

中图分类号: P401 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2008)06-0865-06

Observational Analysis of Raindrop Size Distributions Measured at Surface and Cloud

JIA Xing-can, NIU Sheng-jie

(Key Laboratory for Atmospheric Physics & Environment of China Meteorological Administration, NUIST, Nanjing 210044 China)

Abstract By using the ground-based and airborne measurements of raindrop size distributions (RSDs) during a precipitation process of stratiform cloud appearing on July 9, 1982 in Yinchuan, Ningxia, the characteristics of the surface and upper RSDs are analyzed and compared. It is found that 61.9% surface RSDs exhibit the exponential distribution, whereas 86.4% upper RSDs show the multi-peak distribution. The mean surface and upper RSDs are more suitable to fit with a Gamma function. Result also reveals that the most raindrops near surface are smaller and the most raindrops at the upper are relatively bigger, which is possibly caused by the effects of coalescence, breakup and evaporation of raindrops. In addition, the correlations between the rainfall intensity (I) and the radar reflectivity (Z), the rainwater content (W) and the raindrops concentration (N) are established, respectively. There is a very good correlation between I and Z , and W , but N , parameter N_0 and parameter λ are poor correlated to I .

Key words surface raindrop size distribution; upper raindrop size distribution; stratiform cloud

0 引言

深入研究雨滴谱, 对于更清楚地认识降水的发展演变过程, 揭示层状云中的降水机制, 具有重要的现实意义。我国从 20 世纪 60 年代开始对地面雨滴谱进行观测和研究, 利用地面的雨滴谱连续观测资料, 对不同地区、不同降水类型的雨滴谱分布形式分类分析, 进而分析降水特征和形成机制。陈宝君

等^[1]利用 GBPP-100 型地面雨滴谱仪资料对沈阳夏季积雨云、层状云和积层混合云降水的雨滴谱进行 Marshall-Palmer (M-P) 分布和 Gamma 分布拟合分析。樊玲等^[2]利用 GBPP-100 型地面雨滴谱仪资料分析了哈尔滨地区春夏季层状云降水的雨滴谱分布特征。周毓荃等^[3]利用唐河站 17 次降水资料分析了河南省干旱年的地面雨滴谱特征。牛生杰等^[4]利用 1982—1984 年宁夏 7 个气象站 200 次观测获

收稿日期: 2007-01-16 改回日期: 2008-01-17

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (40537034)

作者简介: 贾星灿 (1983—), 女, 河北石家庄人, 硕士生, 研究方向为云雾降水物理, star19831122@163.com; 牛生杰 (通信作者), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为云雾降水物理、大气气溶胶, nius@mist.edu.cn

取的 6 053 份滴谱资料, 分析了宁夏雨滴谱及有关物理量的特征, 给出了不同雨强下的平均谱分布及谱参数的演变和影响降水的 3 种环流形势下的平均滴谱特征, 分别建立了雷达反射率因子 Z 与雨强、雨滴落地动能通量和雨水含量之间的相关关系。李艳伟等^[5]利用 2001 年 6、7 月的新疆天山山区降水资料, 对山区中雨滴谱谱型进行了 M-P 分布和 Gamma 分布拟合分析。石爱丽等^[6]利用色斑法获得的河南省层状云降水过程的 214 份雨滴谱资料, 分析了此次层状云降水过程中不同地点的雨滴谱分布、微物理参量及其起伏特征。胡娅敏等^[7], 廖菲等^[8]对河南省一次层状云降水的宏观背景及临颖、孟津两站色斑法获取的地面雨滴谱资料的对比, 分析了锋前锋后的云系和雨滴谱特征。李娟等^[9]通过对玛曲地区雨滴谱的分析, 推测玛曲当地的雨滴较大。刘红燕等^[10]根据由声雨滴谱仪器测量得到的雨滴谱资料, 结合降水云的结构将降水云系划分为对流云降水云系和层状云降水云系。通过对这两种降水云系中的稳定雨滴谱特征的分析, 进一步分析划分降水云系的判据。Young^[11]利用数值模拟的方法研究了雨滴下落过程中凝结、碰并、破碎的影响。Atlas 等^[12]利用多普勒雷达和地面雨滴谱资料分析得出在零度层下雨滴谱的碰并、破碎会逐渐达到一个相对平衡的状态, 此时滴谱特征参量变化不大。Robert 等^[13]致力于用 weibull 分布拟合雨滴瞬时谱, 并研究湍流对降水过程的影响。Carlton 等^[14]基于地面雨滴谱资料, 讨论一次风暴中积云向混合云、层云转变过程的谱参数变化。研究地面雨滴谱资料对划分降水类型、降水的发展演变、认识降水特性有一定的意义, 但对雨滴自云中下落的微观过程多采用数值模拟的方法。

本文利用滤纸色斑法连续观测的地面、空中雨滴谱资料研究层状云降水特点和雨滴谱型在云中下落的演变, 并对比地面和空中雨滴谱, 探讨空中雨滴的变化机制, 为数值模拟和实际应用提供基础性理论, 完善人工增雨的科学理论依据。

1 资料获取

此次观测在宁夏银川进行, 并在地面和空中同时采集雨滴样本, 获得了同一次降水过程中的地面、空中雨滴谱资料。空中、地面取样均选用面积为 900 cm^2 的吸水滤纸, 其中读数面积 500 cm^2 , 每次取样约 300 个滴, 暴露时间不超过 60 s。地面取样将涂满滑石粉和玫瑰精的滤纸置于银川站观测场,

记录取样时间, 每 2 次取样间隔 5 min。观测资料介绍见表 1, 地面雨滴谱共 21 个样本, 空中雨滴谱共 59 个样本。

表 1 1982 年 7 月 9 日观测资料

Table 1 The observation data on July 9, 1982

	样本 个数	观测时间		取样间隔 时间	观测 地点
地面	21	20 25—21: 45		5 m in	银川
	21	20 00—20: 27			
空中	38	21 16—21: 49		0.5 1 2 m in	银川

探测飞机为伊尔-14 运输机。飞机从银川起飞, 平均飞行速度 280 km/h 。飞机对雨滴谱的探测分两段 (20 00—20 27, 21 16—21 49) 进行。第一阶段起始探测高度为 1200 m (温度 $20.8 \text{ }^\circ\text{C}$), 飞机盘旋上升, 直至升到 4400 m (云内温度 $-0.1 \text{ }^\circ\text{C}$)。第二阶段取样, 飞机从 4200 m (云内温度 $2.8 \text{ }^\circ\text{C}$) 盘旋下降, 直至 1200 m (温度 $16 \text{ }^\circ\text{C}$) 完成。此次降水云系为雨层云降水, 且伴有碎雨云, 云底高度为 1500 m , $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 层高度为 4300 m 。飞行中采用滤纸色斑法获取空中的雨滴谱, 将取样板水平伸出机窗 1.5 m 远处, 收集打落在取样板上的雨滴。取样间隔不等, 有 0.5 、 1 、 2 min 3 种。

2 天气背景

1982 年 7 月 9 日的降水是一次“东高西低”^[5]环流形势下的冷锋降水。9 日 08 时, 地面冷锋位于河套西侧, 宁夏地区开始有阵性降水天气出现。9 日 14 时, 冷锋主体开始影响宁夏地区, 锋后有 12 hPa 的 24 h 变压和 2.1 hPa 的 3 h 变压, 地面气压梯度较大, 银川和张掖气压差近 10 hPa 。银川站 08 时有轻度沙尘暴; 14 时视区内有降水, 但估计距测站 5 km 以外; 本站 20 时开始降水, 此时空中的主要云系是雨层云和蔽光高层云, 降水类型是间歇性小雨。

3 雨滴谱特征分析

3.1 雨滴谱谱型

按谱型特征将空中、地面雨滴谱分为 3 类, 选取典型的指数型、单峰型、多峰型雨滴谱个例, 如图 1 所示。地面雨滴谱中, 指数型占总样本数的 61.9% , 多峰型次之, 单峰型最少 (表 2)。空中雨滴谱主要是多峰型, 占 86.4% , 与云滴谱的分布十分相似^[7]。空中雨滴在大滴处有多个峰值, 雨滴的碰并、破碎还没达到一种相对均衡的状态^[12]。空中

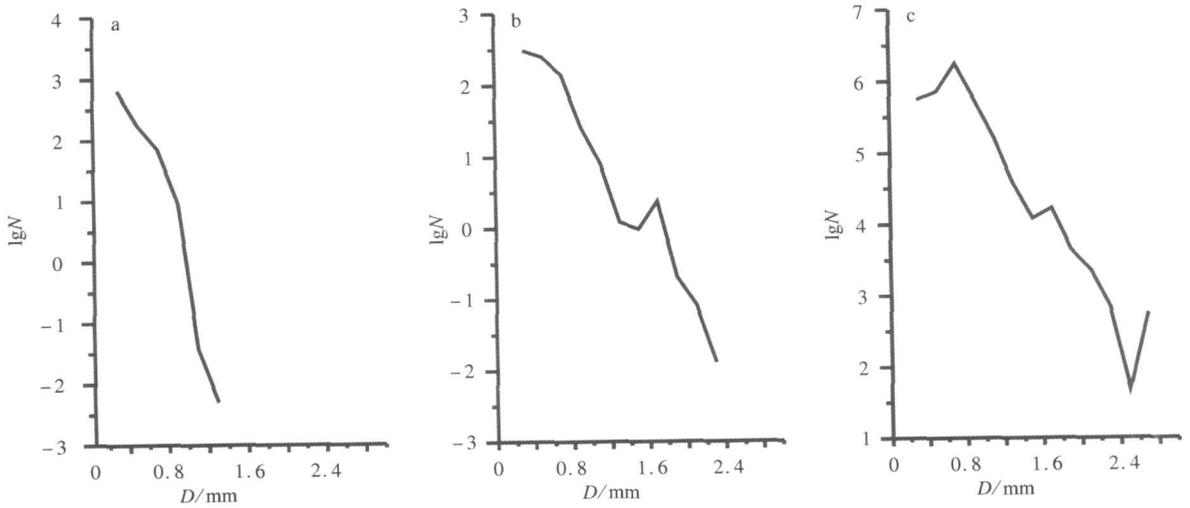


图 1 3 类典型雨滴谱分布 (N 的单位: $\text{个} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 0.2 \text{ mm}^{-1}$)

a 指数型; b 单峰型; c 多峰型

Fig 1 There typical raindrop size distributions (the units of N : $\text{m}^{-3} \cdot 0.2 \text{ mm}^{-1}$)

a exponential distribution; b single peak distribution; c multi peak distribution

雨滴谱相对于地面雨滴谱, 谱宽较大, 其中谱宽大于 2 mm 的宽滴谱, 占空中雨滴谱的 71.2%, 而地面雨滴谱中仅占 33.3%。可见, 在雨滴到达地面的过程中, 大雨滴破碎、蒸发, 消耗明显。

表 2 雨滴谱谱型

Table 2 The percentage of three typical raindrop size distributions

	地面雨滴谱		空中雨滴谱	
	样本数 n	百分比 $P\%$	样本数 n	百分比 $P\%$
指数型	13	61.9	4	6.8
单峰型	3	14.3	4	6.8
多峰型	5	23.8	51	86.4

3.2 雨滴平均谱的拟合

通常用来对雨滴谱进行拟合的方法是: 1) M-P 分布, 形式为 $N = N_0 \exp(-\lambda D)$, D 为直径, λ 为斜率因子, N_0 与数浓度相关; 2) Gamma 分布, 形式为 $N = N_0 D^\mu \exp(-\lambda D)$ 。

对空中雨滴平均谱进行 M-P 分布和 Gamma 分布的拟合 (图 2)。空中雨滴平均谱 M-P 分布的拟合结果是 $\lambda = 0.864$, $N_0 = 20.316$; Gamma 分布拟合的结果是 $\lambda = 1.301$, $\mu = 0.299$, $N_0 = 40.919$ 。M-P 拟合结果和观测值的相关系数为 96.3%, Gamma 分布拟合的相关系数为 97.7%。

对地面雨滴平均谱进行 M-P 分布和 Gamma 分布的拟合 (图 3), 地面雨滴平均谱的 M-P 拟合结果

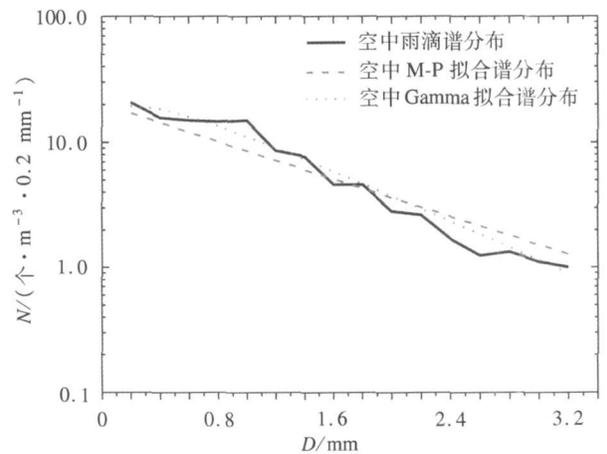


图 2 空中雨滴谱的拟合

Fig 2 Mean and fitted values of the upper raindrop size distribution

$\lambda = 2.935$, $N_0 = 350.731$ 。Gamma 分布拟合的结果是 $\lambda = 2.026$, $\mu = 0.019$, $N_0 = 158.5$ 。M-P 拟合结果和观测值的相关系数为 96.4%, Gamma 分布拟合的相关系数为 98.7%。可见, 两种拟合相差不大, 均能较好拟合这次降水的空中、地面雨滴平均谱, 但 Gamma 分布提高了小滴和大滴段的精度^[5]。

3.3 空中雨滴谱随高度的分布

对 1982 年 7 月 9 日 21:16—21:47 这段时间观测得到的 36 个空中雨滴谱样本按高度将其分为 6 层: 4.2~4.0 km, 4.0~3.5 km, 3.5~3.0 km, 3.0~2.5 km, 2.5~2.0 km, 2.0~1.5 km。由云的宏观资

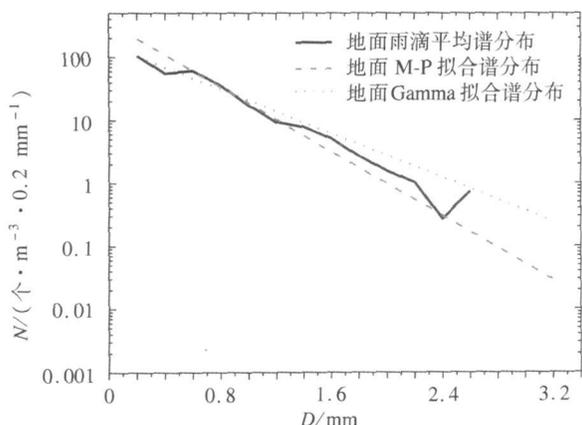


图 3 地面雨滴谱的拟合

Fig 3 Mean and fitted values of the surface raindrop size distribution

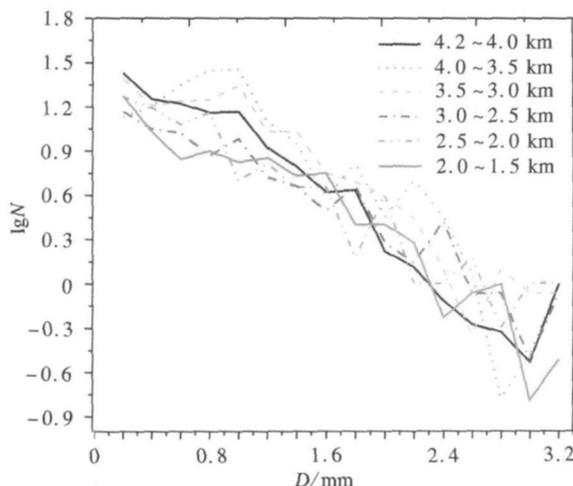


图 4 不同高度层雨滴谱 (N 的单位: 个·m⁻³·0.2mm⁻¹)

Fig 4 The upper raindrop size distributions

at different levels (the units of N: m⁻³·0.2mm⁻¹)

料得知这段雨滴谱位于云底和 0℃层之间,影响雨滴数浓度、大小的主要因素是与云滴和小雨滴的碰并、破碎、蒸发。各高度层雨滴谱特征量见表 3。4.2~4.0 km 高度层靠近零度层,此时雨滴的平均直径最小。在 4.0~3.5 km 高度层平均数浓度达到最大,此层之下随着高度的降低雨滴总数浓度减少,但平均直径增加,由于小滴的数目减少,大滴数目增加,可能受雨滴在下落中碰并小滴增长影响。但 2.5~2.0 km 高度层不满足上述变化。雨滴谱在 D > 1.8 mm 部分滴谱呈明显的多峰分布。

表 3 各高度层雨滴谱特征量

Table 3 The microphysical characteristics of raindrop size distributions at different levels

高度层	平均温度 / ℃	样本数目 / 个	平均数浓度 / (个·m ⁻³)	平均直径 / mm
4.2~4.0 km	3.3	10	117.8	0.67
4.0~3.5 km	4.4	5	198.5	0.77
3.5~3.0 km	6.0	6	152.5	0.86
3.0~2.5 km	9.3	6	119.0	0.88
2.5~2.0 km	10.9	3	87.67	0.69
2.0~1.5 km	14.6	6	107.8	1.02

各高度层雨滴平均谱的变化如图 4 所示。4.0~3.5 km, 3.5~3.0 km 高度层的雨滴谱数浓度在雨滴直径 0.4 mm < D < 2.6 mm 时大于 4.2~4.0 km 层,在此阶段雨滴碰并云滴、凝结增长显著,使得雨滴浓度总体上呈增加趋势。这 3 层温差较小,外界条件差异较小,雨滴在下落中不断碰并云滴增长。与 4.0~3.5 km 高度层相比,3.5~3.0 km 高度层 0.4 mm < D < 1.4 mm 和 2.0 mm < D < 2.6 mm 的

雨滴数浓度减小。

对于 2.5~2.0 km 和 3.0~2.5 km 高度层的雨滴, D < 1.8 mm 的小雨滴数浓度显著降低。滴谱呈现多峰型分布,分别有 5 个、4 个峰值。说明这两高度层雨滴之间的碰并比较活跃,谱型相对不稳定。

雨滴在 2.0~1.5 km 高度层时,雨滴可能受到蒸发影响,雨滴数浓度总体减少。雨滴在下落过程中碰并、破碎、蒸发且伴随着凝结增长。

3.4 空中和地面雨滴平均谱的对比

地面雨滴的平均谱比空中雨滴的平均谱窄,谱形较陡(图 5)。对 D < 1.2 mm 的雨滴,地面雨滴谱数浓度大于空中雨滴谱数浓度。空中雨滴谱在 D > 1.8 mm 的区间,数浓度较大。反映出地面小雨滴比空中多,空中大雨滴比地面多,这可能是雨滴下落到地面的过程中不断的破碎和蒸发所致。

3.5 谱特征参量与地面雨强的关系

建立雨强 I 与雷达反射率因子 Z、雨水含量 W、雨滴数浓度 N、Gamma 分布的谱参数 N₀、λ 的相关关系,了解降水的物理性质。表 4 给出了地面雨滴谱的谱特征量及谱参数与雨强 I 的关系式。对关系式进行拟和,将指数形式转化为线性,确定 A、b 的值。

雨滴谱 Z-I 关系可表示为 Z = 367.089I^{1.189}, W-I 关系可表示为 W = 70.723I^{0.92}, N-I 关系可表示为 N = 254.845I^{0.692}。与牛生杰等^[4]利用 1982—1984 年 6—9 月在宁夏 7 个气象站 200 次观测获取的 6053 份滴谱资料所得出的层状云降水相关关系结果相近。N₀ = 270.927I^{0.519}, λ = 2.628I^{-0.126}, N₀ 有随 I 的

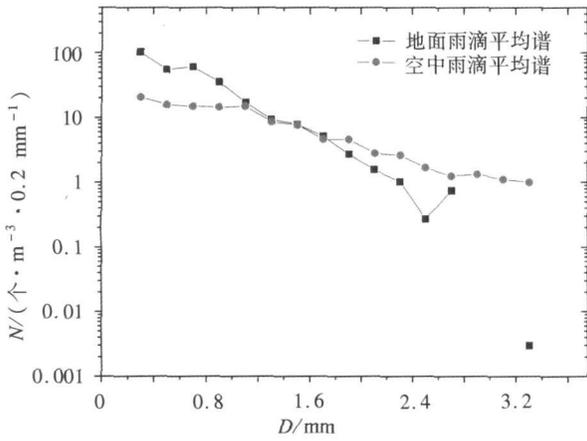


图 5 地面和空中平均雨滴谱的对比

Fig 5 Comparison of the surface raindrop size distribution with the upper one

系点分布较为集中, 相关性很好, 相关系数达到 99.3%、99.8%。而 N-I 关系的点较为分散, 相关性不是很好。

表 4 雨强 I 与各谱特征参量及谱参数的相关关系

Table 4 Correlations between the rainfall intensity(I) and the spectral parameters and the microphysical characteristics

	A	b	相关系数
$Z = A I^b$	367.089	1.189	0.993
$W = A I^b$	70.723	0.920	0.998
$N = A I^b$	254.845	0.692	0.815
$N_0 = A I^b$	270.927	0.519	0.400
$\lambda = A I^b$	2.628	-0.126	0.353

增大而增大、λ有随 I 的增大而减小的趋势, 但是相关系数较低。

4 结论

(1)此次层状云系的降水, 地面雨滴谱主要是

指数型, 占 61.9%; 空中雨滴谱主要是多峰型, 占

指数型, 占 61.9%; 空中雨滴谱主要是多峰型, 占

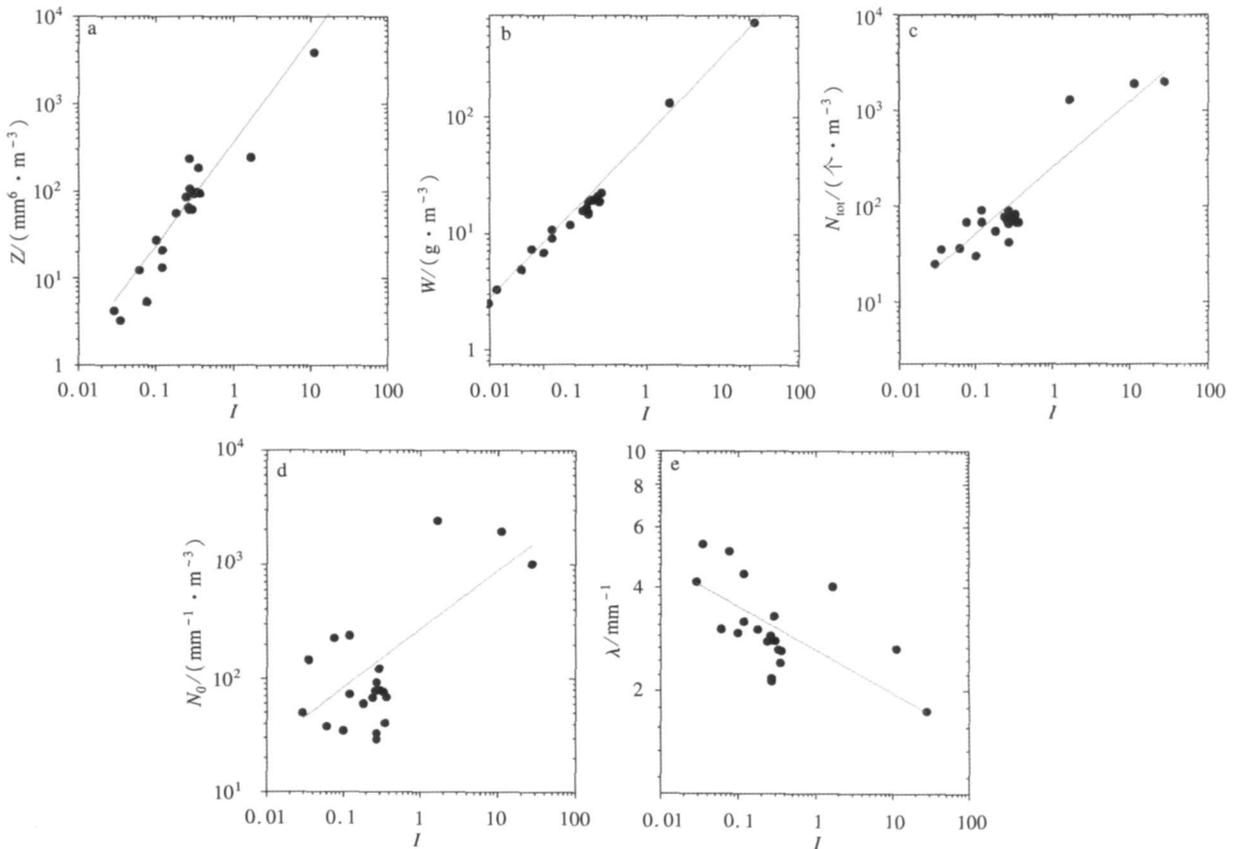


图 6 雨强 I 与雨滴谱物理特征量和谱参数的相关关系

a 雷达反射率因子; b 雨水含量; c 雨滴浓度; d 谱参数 N_0 ; e 谱参数 λ

Fig 6 Correlations between the rainfall intensity(I) and (a) the radar reflectivity(Z), (b) rainwater content(W), (c) raindrops concentration(N), (d) parameter N_0 , and (e) parameter λ , respectively

86.4%。空中较地面有更多的大滴。

(2) M-P 分布和 Gamma 分布均能较好拟合这次降水的空中、地面雨滴平均谱,但 Gamma 分布提高了小滴和大滴端的精度, Gamma 分布的拟合效果更好。

(3) 空中雨滴谱在零度层下 (4.0~3.5 km 高度层) 平均数浓度最大, 此层之下随着高度的降低雨滴数浓度减少, 但平均直径增大。

(4) 地面的雨滴平均谱比空中的雨滴平均谱窄, 地面小雨滴比空中多, 空中大雨滴比地面多, 这可能是受到碰并、蒸发、破碎的共同影响。

(5) 雨滴谱 $Z-I$ 关系可表示为 $Z = 367.089I^{1.189}$, $W-I$ 关系可表示为 $W = 70.723I^{0.92}$, $N-I$ 关系可表示为 $N = 254.845I^{0.692}$ 。 $Z-I$ 关系和 $W-I$ 关系的相关性很好, 而 $N-I$ 关系的相关性不是很好。

参考文献:

- [1] 陈宝君, 李子华, 刘吉成. 三类降水云雨滴谱分布模式 [J]. 气象学报, 1998, 56(4): 506-512
- [2] 樊玲, 袁成, 张云峰. 哈尔滨地区层状云降水微物理特征 [J]. 气象, 2001, 27(12): 42-46
- [3] 周毓荃, 刘小天, 周非非, 等. 河南干旱地面雨滴谱特征 [J]. 应用气象学报, 2001, 12(增刊): 39-47
- [4] 牛生杰, 安夏兰, 桑建人. 不同天气系统宁夏夏季降雨谱分布参量特征的观测研究 [J]. 高原气象, 2002, 21(1): 37-44
- [5] 李艳伟, 杜秉玉, 周晓兰. 新疆天山山区雨滴谱特性及分布模式 [J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(4): 465-472
- [6] 石爱丽, 郑国光, 黄庚, 等. 2002年秋季河南省层状云降水的雨滴谱特征 [J]. 气象, 2004, 30(8): 12-17
- [7] 胡娅敏, 沈桐立, 廖菲. 一次河南省春季层状云降水的地面雨滴谱特征 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(4): 508-515
- [8] 廖菲, 郑国光, 洪延超, 等. 2002年河南春季的一次层状云降水特征研究 [J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(2): 160-168
- [9] 李娟, 游来光, 胡志晋, 等. 黄河上游玛曲地区雨滴谱特征的观测研究 [J]. 高原气象, 2006, 25(5): 942-949
- [10] 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特征 [J]. 大气科学, 2006, 30(4): 693-702
- [11] Young K C. The evolution of drop spectra due to condensation, coalescence and breakup [J]. J Atmos Sci 1975, 32(5): 965-973
- [12] Atlas David William, Christopher R. The anatomy of a continental tropical convective storm [J]. J Atmos Sci 2003, 60(1): 3-15.
- [13] McGraw R, Liu Yangang. Brownian drift-diffusion model for evolution of droplet size distributions in turbulent clouds [J]. Geophys Res Lett 2006, 33(3): 1-4
- [14] Ulbrich C W, Atlas D. Microphysics of raindrop size spectra tropical continental and maritime storm [J]. J Meteor Climatol 2007, 46(11): 1777-1791