

庐山不同高度雨滴谱分析

张 欢^{1,2}, 濮江平¹, 胡子浩¹, 孙海洋³, 周小珂¹

(1. 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101; 2. 中国人民解放军 63788 部队, 陕西 渭南 714000;
3. 北京应用气象研究所, 北京 100029)

摘 要:选取在庐山不同高度处测得的一次对流云降水过程资料,结合 Hu 等相关研究结果,分析了雨滴下落过程中各种物理机制的重要作用,并采用两种不同的水滴下落末速度经验公式,分别比对了不同高度处雨滴下落的末速度。所得结论如下:蒸发作用降低了小雨滴($D \leq 0.3\text{ mm}$)和较大雨滴($1.5\text{ mm} < D < 3.0\text{ mm}$)的数浓度,增加了中等大小雨滴($0.3\text{ mm} < D \leq 1.5\text{ mm}$)的数浓度。大小雨滴在降雨不同时期和不同高度对含水量的贡献是不同的。雨滴直径在 $0.5 \sim 5.0\text{ mm}$ 区间内,下落末速度经验关系式 $V(D) = 9.65 - 10.3e^{-0.6D}$ 适用于海拔较高处;雨滴直径大于 5.0 mm 时,经验关系式 $V(D) = 3.778D^{0.67}$ 适用于海拔较低处。

关键词:雨滴谱;物理机制;速度拟合

中图分类号: P426.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673 - 7148(2013)02 - 0026 - 05

引 言

雨滴谱观测是云降水物理学研究的重要内容之一。通过雨滴谱分布,可以计算各种降水物理参量以及雨滴对微波的衰减,建立雷达反射率因子和降水强度之间的经验关系等^[1-2];更重要的是,雨滴谱反映了成雨过程中云动力学和微物理学之间的相互制约,这对进一步了解自然降水的物理过程,研究成雨机制,评估人工增雨的云水条件,检验催化效果以及数值模拟等方面具有重要意义^[3-6]。

近年来,降水雨滴谱的研究得到广泛的开展。牛生杰等^[4,7]利用宁夏地区不同天气系统和不同降水云系所产生的层状云降水的雨滴谱资料,分析了各种天气系统影响下不同降水云系和不同降水强度云滴、雨滴的谱分布形式;袁成等^[8]分析了哈尔滨地区积雨云、层状云、积层混合云这三类降水云系产生的降水所对应的雨滴谱分布特征。这些研究侧重于对某地不同降水类型的长期观测,而对差异较大的地理环境、气候条件下的地区研究较少,尤其对孤立高山站的观测分析较少。同时,同一次降水过程中高度的差异会导致雨滴谱特征的差异,这些差异

与雨滴在下落过程中受到的物理机制作用息息相关^[9]。Young^[10]利用数值模拟方法研究了雨滴下落过程中凝结、碰并和破碎机制的作用。Hu 等^[11]建立降水模型来模拟雨滴下落过程,对各种物理机制在雨滴下落过程的作用加以探讨。大多数研究对雨滴自云中下落的微观过程采用数值模拟的方法^[12]。本文利用庐山不同高度雨滴谱资料,研究雨滴谱在下落过程中的演变特征,为数值模拟和实际应用提供理论基础,从而进一步完善人工增雨的科学依据。

1 数据的采集和处理

观测实验数据是在庐山上现场采得的。分别在庐山含鄱口索道和太乙村架设一台 Parsivel 激光降水粒子谱仪,进行资料的采集,采样时间为 1 min。两处的经纬度和海拔高度信息见表 1。由于两个观测点的水平距离较为接近,水平差异对降水过程的影响较小,但垂直距离相差 392.1 m,海拔高度的较大差异是造成两处雨滴谱特征差异的主要因素,所以利用以上数据分析雨滴谱在高度上的变化是比较合适的。

收稿日期:2012 - 10 - 15;修订日期:2013 - 01 - 21
基金项目:国家 973 全球变化重大科学研究项目(2010CD950804)资助
作者简介:张欢(1986-),女,陕西咸阳人,助理工程师,硕士,主要从事大气物理与人工影响天气研究. E-mail: baitaoci@sina. com

表1 Parsivel 激光降水粒子谱仪架设的位置信息

观测点	仪器简称	海拔高度/m	经纬度
含鄱口	Parsivel 1	1109.7	29°32'45"N、115°58'50"E
太乙村	Parsivel 2	717.6	29°32'21"N、115°58'46"E

选取 2010 年 7 月 30 日庐山的一次对流云降水过程,Parsivel 1 测得本次降水过程的时间为20:56—22:30,平均降雨强度为 15.287 mm/h,最大降雨强度为 142.507 mm/h;Parsivel 2 测得的降水持续时间为21:14—22:24,平均降雨强度为 21.909 mm/h,最大降雨强度为 117.676 mm/h。

2 不同高度雨滴谱对比分析

2.1 平均雨滴谱对比分析

图 1 为庐山不同高度平均雨滴谱对比图。由图 1 可知,太乙村处粒子浓度要普遍大于含鄱口的,但当直径小于 0.437 mm 时,其粒子浓度小于含鄱口的,并且在直径等于 2 mm 附近,两个高度的粒子浓度几乎相当。同时,在小粒子端 ($D < 1$ mm),太乙村的曲线较含鄱口平缓,其曲线波峰处的粒子直径为 0.562 mm;在大粒子端,两处曲线几乎平行,但当粒子直径超过 9 mm 时,两处曲线出现交叉,含鄱口粒子浓度要高于太乙村,这可能是由于破碎机制的作用,使得海拔较高处的含鄱口,相较于太乙村,拥有较多的超大滴。

Hu 等^[11]在合并、破碎和蒸发机制对雨滴谱演变的影响研究中,建立了阵性降水模型,并利用此模型模拟雨滴下落过程,从而对各种物理机制在雨滴下落过程的作用加以探讨。他们指出:通常雨滴谱随时间的变化可分为两个阶段。在阶段 1 中,合并和破碎作用占主导地位,它们使得雨滴谱分布接近于碰撞平衡;而在阶段 2 中,蒸发作用占主导地位,它部分修改了原来的雨滴谱形状,如图 2 所示。从图 2 可看出,雨滴下落前期,蒸发非常微弱,合并和破碎机制作用曲线与 3 种机制共同作用曲线高度重合;而雨滴下落后期,在直径小于 3 mm 的雨滴中,蒸发机制作用曲线与 3 种机制共同作用曲线大体重合,从而说明了蒸发机制在雨滴下落后期的显著作用。同时,由图 2b、c 也可知,蒸发作用消耗了大量小雨滴 ($D \leq 0.3$ mm);而对于中等大小 (0.3 mm $< D \leq 1.5$ mm) 的雨滴,蒸发作用使其数浓度增加;对于较大雨滴 (1.5 mm $< D < 3.0$ mm),蒸发作用又降

低了雨滴数浓度。整体而言,蒸发作用并不改变雨滴谱的谱型。这与张宇在蒸发机制对雨滴谱下落时演变影响的研究中所得结论大体一致^[13]。

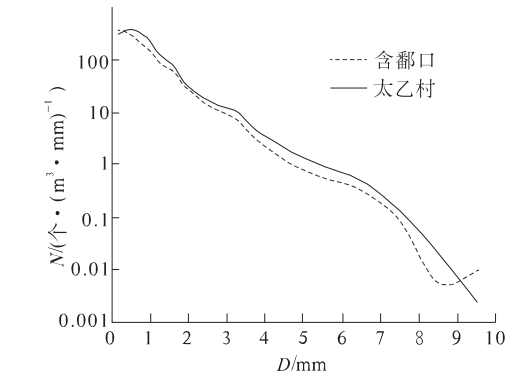


图1 庐山不同高度平均雨滴谱对比图

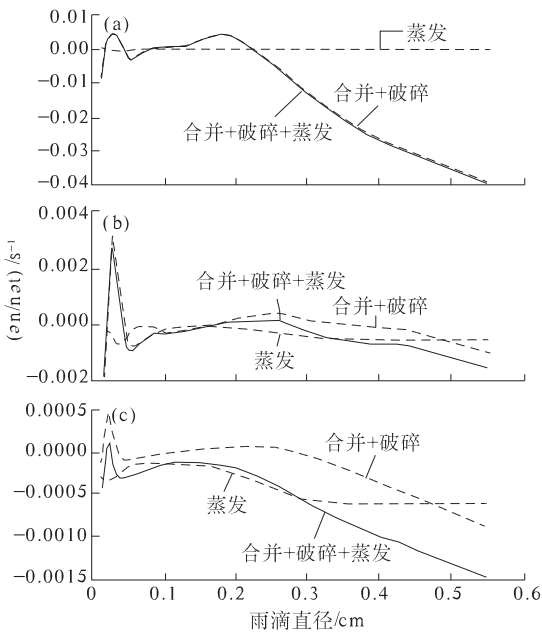


图2 合并、破碎和蒸发对粒子浓度小数变化率的贡献^[11]
(a)、(b)、(c)分别为雨滴谱变化的初期(2 min)、中期(30 min)和后期(60 min)阶段

通过 Hu 等^[11]所做的研究,可以对图 2 所出现的庐山不同高度平均雨滴谱的差异做一些合理的猜测和解释:由于含鄱口海拔高度较高,其所得数据可以较好地代表刚出云的雨滴状态^①,因而可以认为其平均雨滴谱处于雨滴下落过程中的初期阶段,即阶段 1,合并和破碎作用占主导地位;而对于太乙村,则认为其处于雨滴下落过程中的后期阶段,即阶

①濮江平,杨晓兰,张昊,等.中国庐山对流云降水粒子尺度谱观测研究[C]//第28届中国气象学会年会论文集.厦门:中国气象学会,2011:410.

段 2,因而蒸发作用占主导地位,这也就解释了当直径小于 0.437 mm 时,太乙村粒子浓度小于含鄱口的原因。蒸发作用降低了小雨滴的数浓度,但却能增加中等大小雨滴的数浓度。在图 2 中,直径等于 2 mm 附近,太乙村粒子浓度呈现出明显的下凹,使得两个高度的粒子浓度几乎相当。原因之一是蒸发作用降低了较大雨滴的数浓度;同时在含鄱口,当合并和破碎作用占主导时,由合并作用所得到的雨滴在 $1.9\text{ mm} < D < 2.8\text{ mm}$ 范围内较多^[11],相对于太乙村,这也在一定程度上增大了含鄱口在直径等于 2 mm 附近的雨滴浓度,使得两个高度的粒子浓度几乎相当。Hu 等还指出:随着时间的推移,雨滴谱小滴段的波峰被平滑掉,而大滴段则保持着与原来形状互相平行的近似指数形式,即原来的雨滴谱形状

被部分修改^[11],这与含鄱口和太乙村两处的曲线变化相吻合。在大滴段,平衡分布的指数形式被认为是与雨滴碰撞的特定参数化无关的,这种指数形式是重力碰并过程的一个特征^[14],因而两处曲线在大滴段互相平行。

2.2 各微物理参量的特征分析

2.2.1 微物理参量的平均特征

将两处观测的降水资料分别进行计算,求取整个降水过程的微物理参量平均值;同时,将雨滴按尺度大小进行分档,分为 $D < 1\text{ mm}$ 、 $1 \leq D \leq 2\text{ mm}$ 、 $2 < D \leq 3\text{ mm}$ 以及 $D > 3\text{ mm}$ 四档,从而得到各档雨滴对粒子浓度 N 、雨强 I 、含水量 W 的贡献率(单位为%),如表 2 所示。

表 2 降水过程微物理参量资料

观测点	各档雨滴对雨滴浓度贡献率/%				各档雨滴对雨强贡献率/%				各档雨滴对含水量贡献率/%				D_1/mm	$D_{\max}/\text{mm}$
	N_1/N	N_2/N	N_3/N	N_4/N	I_1/I	I_2/I	I_3/I	I_4/I	W_1/W	W_2/W	W_3/W	W_4/W		
含鄱口	74.37	19.76	4.45	1.42	3.01	16.64	25.45	54.90	6.26	22.93	26.42	44.38	0.96	3.58
太乙村	74.08	19.80	4.32	1.79	2.46	11.64	22.76	63.14	6.98	19.16	23.49	50.37	1.28	5.35

注: $N_1 - N_4$ 、 $I_1 - I_4$ 、 $W_1 - W_4$ 分别为 4 个档次雨滴对应的粒子浓度、雨强和含水量。含鄱口观测的粒子浓度(N)、雨强(I)和含水量(W)分别为 $316.44\text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $15.29\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $389.72\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,太乙村的分别为 $406.44\text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $21.91\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $559.63\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

从表 2 可以看出,含鄱口和太乙村两处,各微物理量的平均值都较大,从雨强 I 、平均直径 D_1 以及最大直径 $D_{\max}$ 的平均值可以看出,本次降水为大到暴雨过程。太乙村各微物理量值普遍大于含鄱口。在各档雨滴对微物理量的贡献方面,与含鄱口相比,太乙村处小雨滴数($D < 1\text{ mm}$)相对减少,而大雨滴数($D > 3\text{ mm}$)相对增加,因而大雨滴对雨强和含水量的贡献也明显增大。对于直径为 $1 \sim 2\text{ mm}$ 的雨滴,太乙村处的粒子浓度较含鄱口有所增加,但其雨强和含水量都较含鄱口低,也就是说,直径为 $1 \sim 2\text{ mm}$ 的雨滴在下落过程中,其粒子浓度增大,但对雨强和含水量的贡献率却是减小的。原因可能是蒸发增加了直径小于 1.5 mm 雨滴的浓度,同时减小了直径大于 1.5 mm 雨滴的浓度,而对于相同浓度的大小雨滴,较大雨滴对雨强和含水量的贡献较大。

2.2.2 微物理参量的演变

微物理参量的演变,一方面可以反映出云和降水形成机制上的差异^[15],另一方面也能够更好反映雨滴谱随时间的内在变化,尤其是对不同高度雨滴谱微物理参量演变的对比分析,更能清楚地认识到雨滴在下落过程中,各种物理机制所起的重要作用。

从图 3 可以看到,含鄱口降雨前期的含水量要

大于后期,而太乙村降雨前期的含水量要小于后期。同时,含鄱口降雨前期相较于后期,雨滴最大直径、平均直径都较大,但粒子浓度较低,由此可知,前期大雨滴数量较多;太乙村降雨后期相较于前期,雨滴平均直径和最大直径都较小,但粒子浓度普遍较大,表明后期小雨滴数量相对较多。由此可见,含鄱口降雨前期,大雨滴对降雨量的贡献相对较大,而太乙村降雨后期,小雨滴对降雨量的贡献相对较大,从而也说明了大小雨滴在降雨不同时期和不同高度对含水量的贡献是不同的。造成这种现象的主要原因之一,是雨滴下落过程中各种物理机制对雨滴的影响。

2.3 速度谱对比分析

Gunn 和 Kinzer^[16]采用电子技术,在污浊空气中利用不同质量的 1500 多个蒸馏水滴,研究了水滴等效直径与下落速度之间的关系。Atlas 等^[17]在 1973 年给出了标准温度和气压下的水滴末速度公式为 $V(D) = 9.65 - 10.3e^{-0.6D}$,其对 Gunn 和 Kinzer 所得的数据拟合效果非常理想。1977 年,Atlas 和 Ulbrich^[18]又通过研究得出水滴下落末速度与直径的对应关系为 $V(D) = 3.778D^{0.67}$,并且证明了上述关系式在 $0.5\text{ mm} \leq D \leq 5.0\text{ mm}$ 范围内,能很好地拟合 Gunn 和 Kinzer 所得的数据。

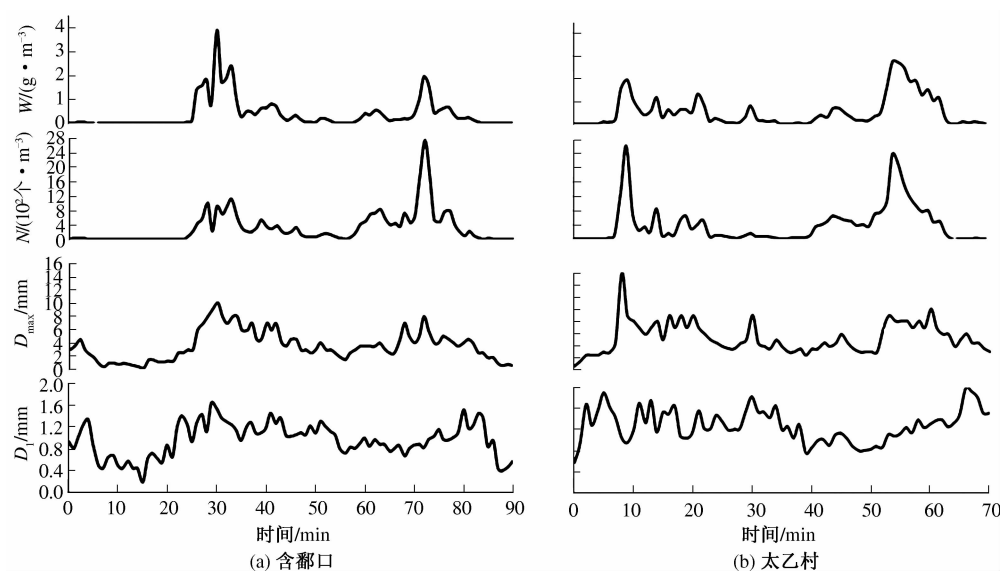


图 3 不同高度降水各微物理参量随时间变化的对比图

利用上述两种不同的速度经验关系式来分别比对庐山不同高度雨滴下落的末速度,从而分析不同速度经验关系式在不同高度上的适应性。如图 4 所示, $V1$ 为 $V(D)=9.65-10.3e^{-0.6D}$, $V2$ 为 $V(D)=3.778D^{0.67}$ 。从图 4 可以看出,雨滴直径较小 ($0.5\text{ mm}\leq D\leq 3.0\text{ mm}$) 时, $V1$ 与含鄱口、太乙村速度曲线较为接近,尤其在整体 $0.5\text{ mm}\leq D\leq 5.0\text{ mm}$ 范围内, $V1$ 与含鄱口速度曲线更为接近;而当 $D>5.0\text{ mm}$ 时, $V2$ 与两处速度曲线较为接近,尤其与太乙村的接近程度更高。

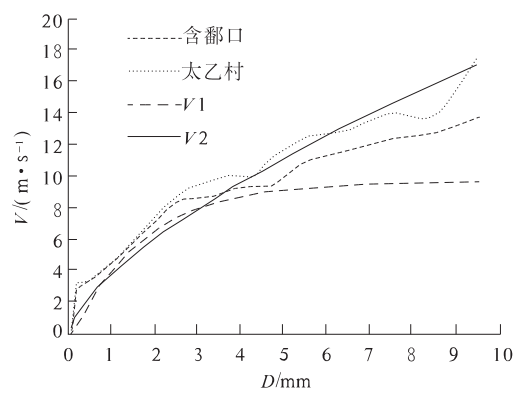


图 4 庐山不同高度雨滴下落末速度与经验关系式的对比图

分别求取 $0.5\text{ mm}\leq D\leq 5.0\text{ mm}$ 和 $D>5.0\text{ mm}$ 两个直径区间内 $V1$ 、 $V2$ 和含鄱口、太乙村曲线的残差平方和,结果如表 3 所示。从表 3 可看出,直径在 $0.5\sim 5.0\text{ mm}$ 区间内, $V1$ 与含鄱口的残差平方和最小,为 6.9639,说明 $V1$ 在直径 $0.5\sim 5.0\text{ mm}$ 区间内,对含鄱口处雨滴下落末速度的曲线拟合效果最

好,即其适用于对含鄱口曲线的描述;而直径大于 5.0 mm 时,相较于 $V1$ 、 $V2$ 与含鄱口、太乙村曲线的残差平方和都较小,并且 $V2$ 与太乙村曲线的残差平方和仅有 4.8743,说明两条曲线接近程度非常高,即 $V2$ 在直径大于 5.0 mm 时,适用于对太乙村曲线的描述。

表 3 不同区间内各曲线的残差平方和

直径区间 /mm	经验关系式	残差平方和	
		含鄱口	太乙村
0.5 ~ 5.0	$V1 = 9.65 - 10.3e^{-0.6D}$	6.9639	18.3476
	$V2 = 3.778D^{0.67}$	12.3296	16.1242
5.1 ~ 10.0	$V1 = 9.65 - 10.3e^{-0.6D}$	43.3994	124.5017
	$V2 = 3.778D^{0.67}$	28.3657	4.8743

3 结 论

- (1)太乙村的粒子浓度普遍大于含鄱口的,但当直径小于 0.437 mm 时,其粒子浓度小于含鄱口的,在直径等于 2 mm 附近,两个高度的粒子浓度几乎相当。同时,在小粒子端 ($D<1\text{ mm}$),太乙村的曲线较含鄱口平缓,其曲线波峰处的粒子直径为 0.562 mm ;在大粒子端,两处曲线几乎平行,但当粒子直径超过 9 mm 时,两处曲线出现交叉,含鄱口粒子浓度要高于太乙村。
- (2)蒸发作用降低了小雨滴 ($D\leq 0.3\text{ mm}$) 和较大雨滴 ($1.5\text{ mm}<D<3.0\text{ mm}$) 的数浓度,增加了中等大小雨滴 ($0.3\text{ mm}<D\leq 1.5\text{ mm}$) 的数浓度,但整体而言,蒸发作用并不改变雨滴谱的谱型。
- (3)太乙村的各微物理量值普遍大于含鄱口

的。大小雨滴在降雨不同时期和不同高度对含水量的贡献是不同的。

(4)直径在 0.5 ~ 5.0 mm 区间内,水滴下落末速度经验关系式 $V(D) = 9.65 - 10.3e^{-0.6D}$ 适用于对含鄱口曲线的描述;直径大于 5.0 mm 时,经验关系式 $V(D) = 3.778D^{0.67}$ 适用于对太乙村曲线的描述。

参考文献

[1] 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.

[2] 冯雷,陈宝君. 利用 PMS 的 GBPP-100 型雨滴谱仪观测资料确定 Z-R 关系[J]. 气象科学,2009,29(2):192-198.

[3] 濮江平,张伟,姜爱军,等. 利用激光降水粒子谱仪研究雨滴谱分布特性[J]. 气象科学,2010,30(5):701-707.

[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] 史晋森,张武,陈添宇,等. 2006 年夏季祁连山北坡雨滴谱特征[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2008,44(4):55-61.

[6] 濮江平,赵国强,蔡定军,等. Parsivel 激光降水粒子谱仪及其在气象领域的应用[J]. 气象与环境科学,2007,30(2):3-8.

[7] 牛生杰,何珍珍. 降水性层状云中水凝物的谱分布[J]. 高原气象,1995,14(1):114-120.

[8] 袁成,樊玲,李亚滨. 哈尔滨地区春夏季降水微结构特征[J]. 南

京气象学院学报,2001,24(2):250-257.

[9] 张昊. 不同海拔高度地区降水微物理特性研究[D]. 南京:解放军理工大学,2011.

[10] Young K C. The evolution of drop spectra due to condensation, coalescence and breakup[J]. J Atmos Sci,1975,32(5):965-973.

[11] Hu Z L, Srivastava R C. Evolution of raindrop size distribution by coalescence, breakup, and evaporation: theory and observations [J]. Hu And Srivastava,1995,52(10):1761-1782.

[12] 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.

[13] 张宇. 雨滴下落过程谱分布演变数值模拟[D]. 南京:南京信息工程大学,2011.

[14] Srivastava R C. On the role of coalescence between raindrops in shaping their size distribution[J]. J. Atmos. Sci.,1967,24:287-291.

[15] 张国庆,孙安平,周万福,等. 青海门源雨滴谱特征及降水机制的初步分析[J]. 高原气象,2009,28(1):78-84.

[16] Gunn R, Kinzer G D. The terminal velocity of fall for water drops in stagnant air[J]. Journal of Meteorology,1949,6:243-248.

[17] Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence [J]. Rev. Geophys. Space Phys.,1973,11:1-35.

[18] Atlas D, Ulbrich C W. Path-and area integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3 cm band[J]. Journal of Applied Meteorology,1977,16:1322-1331.

Analysis of Raindrop Spectrum at Different Altitudes in Lushan

Zhang Huan^{1,2}, Pu Jiangping¹, Hu Zihao¹, Sun Haiyang³, Zhou Xiaoke¹

(1. School of Meteorology and Oceanography of PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;
2. No. 63788 Troops of PLA, Weinan 714000, China;
3. Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China)

Abstract: The thesis chooses the data on the process of convective precipitation observed at different altitudes in Lushan, and analyzes the important role of the various physical mechanisms when raindrop falling, referring to Hu et al research results. While using two empirical formulas of the fall final velocity of water droplets, we compare the fall final velocities of water droplets at different altitudes separately, and the conclusions are as follows: evaporation decreases the number concentrations of small raindrop ($D \leq 0.3$ mm) and large raindrop ($1.5 \text{ mm} < D < 3.0 \text{ mm}$), and increases the number concentration of medium sized raindrop. The contributions of different sizes raindrops to water content are different at different precipitation periods and altitudes. When raindrop diameter is between 0.5 and 5.0 mm range, the empirical formula $V(D) = 9.65 - 10.3e^{-0.6D}$ is applied to higher elevations; and when diameter is greater than 5.0 mm, the other one $V(D) = 3.778 D^{0.67}$ is applied to lower elevations.

Key words: raindrop spectrum; physical mechanism; velocity fitting