

环境风对光学雨滴谱仪探测的影响

郑铮¹ 刘晓阳^{1,†} 周守根² 王鹏飞³

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;
3. 北京智阳科技有限公司, 北京 100012; † 通信作者, E-mail: xyl@pku.edu.cn

摘要 为了研究环境风影响下激光雨滴谱仪探测数据的应用, 基于北京2018年6—8月的多次降水过程, 对比架设于不同高度的OTT-Parsivel激光雨滴谱仪和超声风温仪的探测结果, 分析环境中不同强度的水平和垂直风对雨滴谱仪观测的影响。结果表明, 水平风速小于10 m/s且垂直风速大于0.4 m/s时, 利用OTT-Parsivel观测的速度谱估计垂直风速, 80%以上的估计值与超声风温仪观测值一致; 对雨滴垂直速度的修正会使计算得出的直径1 mm左右的雨滴数浓度发生显著变化, 进而影响雨滴谱衍生物理量; 借助定义的样本速度谱平均标准差和异常雨滴比例两个特征参数, 可以识别80%水平风速大于10 m/s的样本。

关键词 雨滴谱(RSD); Parsivel; 风速; 落速修正

Effect of Environment Wind on Measurement of Optical Disdrometer

ZHENG Zheng¹, LIU Xiaoyang^{1,†}, ZHOU Shougen², WANG Pengfei³

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 3. Beijing Intell-sun Technology Limited, Beijing 100012;
† Corresponding author, E-mail: xyl@pku.edu.cn

Abstract To analyze the data detected by optical disdrometer under the influence of environment wind, this paper uses data measured by OTT-Parsivel and ultrasonic anemometer during several precipitation processed in 2018 in Beijing, and studies how horizontal and vertical wind affect the measurement of disdrometer respectively. When horizontal wind speed is less than 10 m/s and vertical wind speed is less than 0.4 m/s, more than 80% vertical wind speed estimated by velocity of hydrometeors from OTT-Parsivel are consistent with that given by anemometer. While the correction of velocity of hydrometeors brings significant change to raindrop whose diameter is about 1 mm, thereby affects other parameters. Moreover, this paper defines two feature parameters calculated from size and velocity of hydrometeors: the average of standard deviation and the ratio of outlier, which can distinguish more than 80% samples with horizontal wind speed more than 10 m/s.

Key words raindrop size distribution (RSD); Parsivel; wind speed; correction of velocity

雨滴谱是降水的基本微物理量, 反映雨滴数浓度与雨滴尺度的关系。基于雨滴谱分布, 可以计算多种降水相关参量, 如降水强度、雷达反射率因子和平均粒径等。同时, 雨滴是云的动力和微物理过程的结果, 通过对雨滴谱的分析, 可以进一步研究成雨机制^[1], 进而提高雷达定量估计降水的精度, 对改进模式中的降水参数化方案有重要意义。

早期的雨滴谱测量方法有滤纸色斑法、动力学法和快速摄影法等^[2]。这些传统的方法效率较低, 逐渐被各种基于光电和声电原理的仪器取代。光学粒子测量仪通常利用粒子对信号的遮挡来测量粒子的尺度和下落速度, OTT-Parsivel激光雨滴谱仪(简称Parsivel)就是利用雨滴消光原理来观测降水的仪器。本文利用Parsivel雨滴谱仪进行观测。

国家重点研发计划(2017YFC0209602)和国家自然科学基金(4147501)资助

收稿日期: 2019-08-19; 修回日期: 2020-04-10

从垂直尺度上看,雨滴在下落过程中会经历蒸发、碰撞合并(简称碰并)及破碎等过程^[3],因此不同高度上的雨滴谱有所不同。目前,广泛应用雷达进行定量的降水测量^[4],但受地球曲率和雷达观测方式的影响,即便是在低仰角情况下,测得的并非地面降水信息^[5]。为了合理地利用雷达资料,有必要研究雨滴谱随高度变化的规律,从而得到雷达反射率因子的垂直分布特征。张昊等^[6]基于2010年7月的一次降水过程,利用架设在庐山不同海拔高度的 Parsivel 激光雨滴谱仪的观测资料进行分析,给出雨滴谱变化特征。陈聪等^[7]基于2011年6月黄山的一次降水过程,分析不同高度的雨滴谱特征,并讨论出现差异的原因。Hu等^[3]利用碰撞方程,在理论层面研究雨滴下落的碰并和破碎等过程。Barthes等^[8]在进一步分析雨滴下落过程中碰并和破碎等造成雨滴谱的垂直变化时,假设环境中不存在水平风。Friedrich等^[9]利用两种不同观测模式的 Parsivel 雨滴谱仪,讨论强风下观测数据的特征,提出将受强风影响的观测样本直接剔除。

上述研究中,大多直接假设水平风不存在,或只讨论环境风较弱情况下的雨滴谱垂直分布。实际上,降水过程常伴随较强的垂直和水平环境风,并且风速随高度增加而增大。因此,需要分析环境风对雨滴谱仪探测的影响,才能确定雨滴谱仪架设在高处的可行性。本文基于北京2018年夏季的多次降水过程,对比架设在不同高度的 Parsivel 激光雨滴谱仪和超声风温仪的探测结果,分析垂直和水平风对雨滴谱仪观测的影响,对观测数据进行测速订正。另外,在环境风未知时,提出平均标准差和异常雨滴比例两个特征参数,尝试识别明显受水平风影响的样本。

1 仪器和数据处理方法

观测点位于北京市中国科学院大气物理研究所铁塔(116.22°E, 39.58°N, 海拔49 m, 塔高320 m)。在地面、140 m和280 m平台搭载3台 Parsivel 激光雨滴谱仪,在140 m和280 m平台搭载两台超声风温仪(图1),本文选取2018年6—8月的降水过程进行分析。

1.1 测量原理

Parsivel 激光雨滴谱仪能够发射激光束(长180 mm, 宽30 mm, 高1 mm),利用雨滴通过时激光信号的衰减强度探测雨滴的大小、持续时间和速度。



图1 仪器安装位置

Fig. 1 Location of the instruments

仪器分别有32个非等间隔的尺度通道和速度通道,直径探测范围为0.2~25 mm,速度探测范围为0.2~20 m/s^[10],探测资料为分钟降水记录,即每60 s得到 $32 \times 32 = 1024$ 个观测数据,分别对应各尺度、速度通道的雨滴数,将其记为一条样本。

超声风温仪利用超声波测量风速、风向及温度,可以准确地测量风的三维脉动^[11],是目前广泛使用的测风仪器。采样频率为10 Hz,即每分钟测得600组数据。为配合激光雨滴谱仪数据进行分析,本文对每分钟风速及风向数据进行基本质量控制后,取其统计量。

1.2 数据处理

由于 Parsivel 雨滴谱仪最小两档尺度通道对应的雨滴直径过小,信噪比较低,并且自然界降水中几乎不存在直径8 mm以上的雨滴,因此直接剔除这两个通道内测得的数据。直径较大的雨滴在下落过程中会变形为近似椭球,导致粒径测算误差(形变雨滴通过激光束时,实测的是长轴直径)。本文首先对雨滴直径进行轴比订正,参考 Pruppacher 等^[12]提出的订正方法:

$$b/a = 1.03 - 0.062D_0 = 2a^{2/3}b^{1/3}, \quad (1)$$

其中, D_0 是雨滴的等效球形直径, a 和 b 分别为变形雨滴的长轴和短轴长度(mm)。经过轴比订正后,雨滴直径减小,测量值越大,订正量越大。由于 Parsivel 雨滴谱仪对雨滴粒径的分档观测方式,因此订正结果只对第18及更大的直径通道有影响,对应直径大于3.75 mm的雨滴。

雨滴谱仪能同时测量雨滴速度和直径,根据

Atlas等^[13]的研究结果,静止大气中雨滴下落末速度与直径存在以下关系:

$$v_d = 9.65 - 10.3e^{-0.6D}, \quad (2)$$

其中, D 是雨滴直径(mm), v_d 表示雨滴下落末速度(m/s)。对于超出理论末速度与直径关系一定范围的雨滴,相关研究中多采用与 Jaffrain 等^[14]类似的方法,通过剔除理论速度值 $\pm 60\%$ 区间以外(即测速位于 $[0.4v_d, 1.6v_d]$ 区间外)的雨滴进行质量控制。本文中雨滴谱仪架设高度处环境风较强,雨滴落速可能与理论值相差较大,不适合采用上述方法,而是在速度-直径关系理论值的约束条件下,改用速度谱特征作为数据质量控制的参考(将在3.4节详述)。

雨滴谱仪的直接观测数据是 32×32 个通道的雨滴数目。本文在轴比订正后,对其进行转换,得到单位体积和单位粒径内的雨滴数目(数浓度):

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{32} \frac{n(D_i, v_j)}{0.18 \times 0.03 v_j \Delta D_i \Delta t}, \quad (3)$$

其中, $n(D_i, v_j)$ 表示位于第 i 个尺度区间和第 j 个速度区间的雨滴数, D_i 表示第 i 个尺度区间的中心直径(mm), v_j 表示第 j 个速度区间的中心速度(m/s), ΔD_i 表示第 i 个区间的尺度间隔(mm), 采样时间间隔 $\Delta t = 60$ s。 $N(D_i)$ 即为雨滴谱(raindrop size distribution, RSD)。

超声风温仪精度高,响应快,运行稳定,其探测精度几乎不受环境温度和湿度的影响。它的输出值包含基本的异常判别码,若1分钟内的600组数据中异常值占比大于30%,本文认为这1分钟内的数据无效,不予分析,反之则用分钟平均值代替无效数据。接着,对每分钟的600组环境风速(u, v, w)数据,按照3倍标准差的阈值进行野点剔除,将剩余数据分为10个等距区间。最后,对出现频率最高的区间所有数据计算均值,作为分钟级 u, v, w 结果,结合雨滴谱仪的速度谱做进一步分析。

2 观测资料概述

2018年夏季,北京发生多次降水。Parsivel 雨滴谱仪探测阈值为0.001 mm/h,若测得降水时间间隔1小时以上,则记为两次降水过程,持续时间不足30分钟的过程不予考虑。同时结合140 m和280 m两个高度的超声风温仪探测结果,雨滴谱仪和风速仪均得到有效数据的时长有10430分钟,地面总

降水量为349.2 mm,表1给出6—8月降水的基本信息,其中7月的地面降水量及样本数最多。

将 u, v 合成为水平方向的环境风速 u_h , 图2给出140 m和280 m处环境水平风速和垂直风速的统计结果,可见风速较大的数据占比随高度递增,但95%以上的样本中水平风速小于12 m/s,垂直风速在 $-1.5 \sim 1.5$ m/s之间(正值表示环境中存在上升气流,负值表示环境中存在下沉气流)。

不考虑环境水平风和垂直风的风向,将表1中所有雨滴谱仪测得的样本按照风速进行分类,图3显示未经质量控制的原始速度谱在3种水平风和垂直风速情况下的平均速度谱。可以看出,在弱环境风的情况(图3(a))下,若采用 $\pm 60\%$ 的标准进行质量控制,对原始数据的改变几乎可以忽略;水平风弱但垂直风强(图3(b))时,有较多雨滴出现在虚线外,但总体上依然集中于虚线内侧;水平风强但垂直风弱(图3(c))时,大量雨滴位于虚线外侧,且主要在下方,各粒径的速度分布较为离散,若用 $\pm 60\%$ 的标准则会剔除更多雨滴。

3 分析与讨论

3.1 垂直风速对速度谱的影响

Parsivel 雨滴谱仪各通道探测雨滴落速的分辨率分别为0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.6 m/s, 当环境垂直风速位于雨滴谱仪某测速分辨率区间时,对雨滴落速探测值的影响是相同的,因此可依据雨滴谱仪的测速分辨率划分环境垂直风速的统计区间。据此统计140 m和280 m两个高度处超声风温仪的探测结果,表2列出环境垂直风速探测值在各区间的占比,可见70%左右的样本同一时刻的环境垂直风速绝对值小于0.4 m/s。

将上述14个风速区间合并为6个,其中正负区间各3个: $-0.4 < w < 0$, $-1.6 < w < -0.4$, $w < -1.6$, $0 < w < 0.4$, $0.4 < w < 1.6$, $w > 1.6$ (m/s), 分别对应图4(a)~(f)。考虑到速度谱在水平风速大于10 m/s时分布较离散

表1 降水基本信息

时间	降水过程数	总样本数	地面降水量/mm
2018年6月	9	1512	53.21
2018年7月	21	6690	187.20
2018年8月	15	2328	108.79
总计	45	10430	349.20

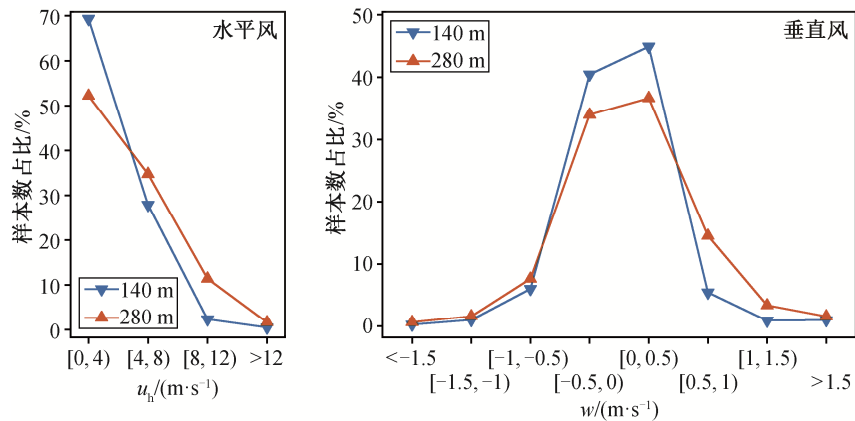
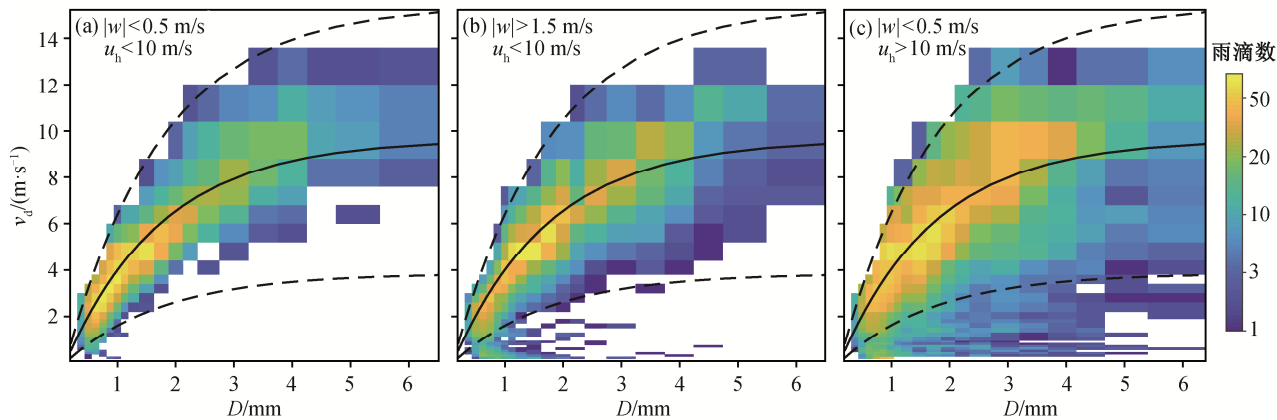


图 2 风速分布统计
Fig. 2 Statistics of wind speed



黑色实线表示 Atlas 理论落速，两条虚线之间为理论值 $\pm 60\%$ 误差区间， $|w|$ 表示垂直风速的绝对值

图 3 不同环境风速下的平均速度谱

Fig. 3 Velocity of hydrometeors with different environmental wind

表 2 超声风温仪测得垂直风速的区间分布
Table 2 Statistics of vertical wind measured by ultrasonic anemometer

$ w /(m \cdot s^{-1})$	占比/%	
	$w > 0$	$w < 0$
0~0.1	13.5	11.1
0.1~0.2	11.6	8.5
0.2~0.4	12.1	13.1
0.4~0.6	7.3	6.3
0.6~0.8	4.5	2.8
0.8~1.6	4.8	1.8
>1.6	1.4	0.2

(图 3(c)), 为排除其干扰, 去除超声风温仪测得水平风速大于 10 m/s 的雨滴谱样本, 对剩余 9106 条样本进行分类。与图 3 相同, 图 4 中均是未经质量控制的原始数据, 各子图对应不同垂直风速下的速度谱

平均情况, 采用与图 3 相同的色标。对比图 4 上下两行可见, 垂直风速为正值或负值时, 雨滴落速中心值与理论末速度有不同的偏差, 若存在下沉气流(风速为负值), 多数雨滴速度测值偏大, 存在上升气流时则相反。对比图 4 中从左至右 3 列可见, 上述现象在垂直风速小于 0.4 m/s 时不明显, 而风速增大时偏差变大。图 4(f)中, 在直径 1 mm 左右出现大量速度接近 0 的雨滴, 可能是由于上升气流较强, 部分小雨滴呈现悬浮状态。因此, 环境垂直风速大于 0.4 m/s 时, 不同的风速对雨滴速度谱的影响程度不同。

针对图 4(b), (c), (e)和(f)中 4 种垂直风速情况, 分别计算各粒径的速度平均测值, 结果如图 5 所示。不同的环境垂直速度对测速均值的影响程度不同, 垂直风速越大, 实测速度与理论值偏离越多(如图 5 中蓝色与红色、黄色与紫色的对比), 但这 4 种

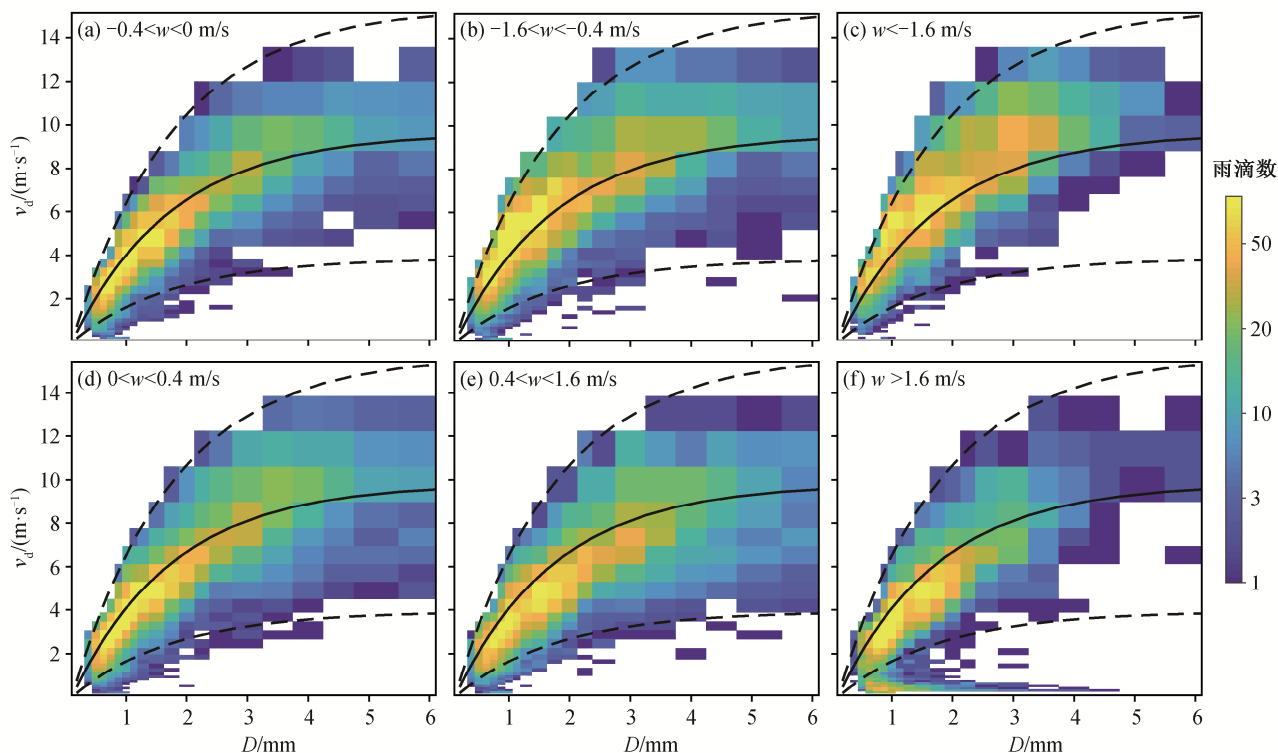


图 4 不同垂直风速对应的速度谱
Fig. 4 Velocity of hydrometeors with different vertical wind

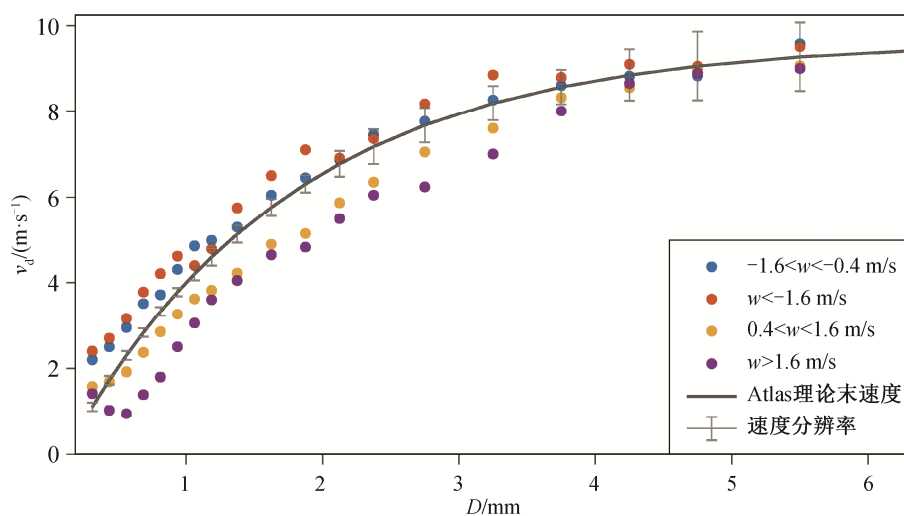


图 5 不同垂直风下的测速均值
Fig. 5 Mean measured velocity with different vertical wind

情况下垂直风速对直径 3.5 mm 以上的雨滴落速影响不明显,可能与 Parsivel 的分档观测方式有关。从图 5 可知,大雨滴对应的速度区间,灰色误差条的高度相应较大,如直径为 3.75 mm 的雨滴,其理论落速区间对应 8.0~9.6 m/s,分辨率为 1.6 m/s。多数情况下,速度小于 1.6 m/s 的垂直风不足以影响观

测结果。

3.2 垂直风速的估计

从 3.1 节的分析可知,在 9106 条样本中,不同强度的垂直风对 Parsivel 观测的原始速度谱产生不同程度的影响。Kim 等^[15]提出利用 Parsivel 测得数据,通过计算雨滴各速度通道平均落速与各粒径雨

滴的理论落速均值之差来估计环境垂直风速,并结合超声风温仪进行对比,在韩国智异山2016年7月的一次降水过程中验证有效,计算公式如下:

$$w = v_p - v_f = \frac{\sum_{j=1}^{32} v_j \sum_{i=1}^{32} n_{ij}}{\sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} n_{ij}} - \frac{\sum_{i=1}^{32} v_{di} \sum_{j=1}^{32} n_{ij}}{\sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} n_{ij}}, \quad (4)$$

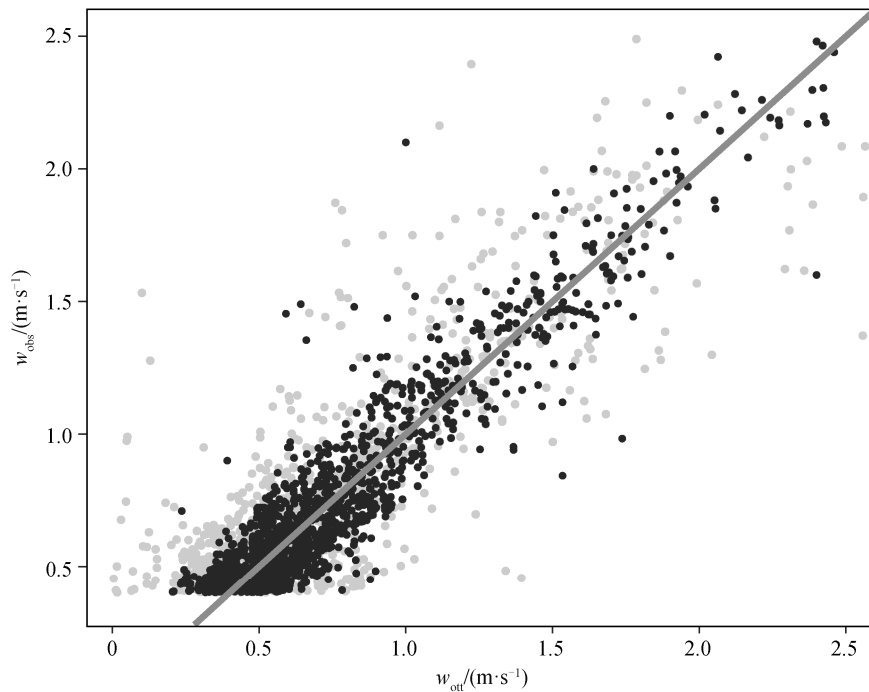
其中, v_p 为各速度通道雨滴平均落速, v_f 为各粒径雨滴的理论落速均值, v_j 表示第 j 个速度区间的中点值, v_{di} 表示第 i 个直径区间的理论落速。 v_j 是基于实测的速度谱, v_{di} 是基于实测雨滴谱对应的理论速度,环境垂直风是两者之间产生差距的原因之一。

将垂直风速估计方法(式(4))应用于本文所有样本。由于当雨滴数较少或垂直风速较小时,数据的随机误差较大,因此选择探测总雨滴数大于200,超声风温仪测得垂直风速绝对值大于0.4 m/s的雨滴谱样本。满足此条件的样本共有2689条。参考Kim等^[15]的方法进行估计,若超声风温仪探测结果与由Parsivel雨滴谱仪观测速度谱估计的垂直风速位于3.1节所述同一测速分辨率区间,则认为两者“一致”。经计算,2689条样本中,有约67%的样本符合条件,对应图6中浅灰色数据点;若对其中水

平风速小于10 m/s的2172条样本进行估计,则两者一致样本的占比提高到82%,对应图6中黑色数据点。因此,Kim等^[15]的方法对本文数据有效。

以北京7月24日降水为例。受台风“安比”外围云系影响,北京出现持续性强降水,观测点在当天04:17—12:12期间累计降水达25.4 mm,其中地面观测分钟最大雨强(R)为16.1 mm/h,平均雨强(\bar{R})为3.6 mm/h,降水过程较平稳,共采集476条样本。表3列出该次降水在140 m和280 m高度处的观测值,可见水平风速在两个高度接近,280 m处部分时刻水平风速较大,达10 m/s以上;垂直风速在140 m处的绝对值较小,80%以上的时间在 ± 0.5 m/s内变化,而280 m处90%以上的时间均为上升气流,平均速度为0.92 m/s。

由于140 m处垂直风不大,仅对280 m处该次降水的476条样本利用Kim等^[15]的方法进行垂直风速估计。图7显示,81%的样本估计值与观测值一致。在超声风温仪测得的水平风速大于10 m/s(图7中浅灰色阴影区)时,利用速度谱估计垂直风速的结果与观测值几乎没有相关性,而垂直风速估计准确度与雨强也没有明显的相关性。可见,利用速度



浅灰色圆点代表探测总粒子数大于200,超声风温仪测得垂直风速绝对值大于0.4 m/s的2689条样本,黑色圆点代表其中水平风速小于10 m/s的2172条样本;深灰色实线表示垂直速度估计值与观测值相等的情况; w_{est} 表示垂直风速估计值, w_{obs} 表示超声风温仪观测值

图6 垂直风速估计值与观测值

Fig. 6 Estimations and observations of vertical wind speed

表 3 7 月 24 日降水观测量
Table 3 Measurements of precipitation on 24th July

高度/m	$\bar{R}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	$\bar{u}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$u_{\text{max}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\bar{w}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$w_{\text{max}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
140	3.71	5.7	9.2	0.12	0.95
280	3.64	6.1	12.4	0.91	3.26

谱估计垂直风速的方法在降水过程伴随稳定的上升或下沉气流,且水平风速不大时有显著效果。例如,图 7 中数据去除浅灰色阴影部分后,实测与估计的垂直风速相关系数为 0.72。

3.3 垂直风速的修正

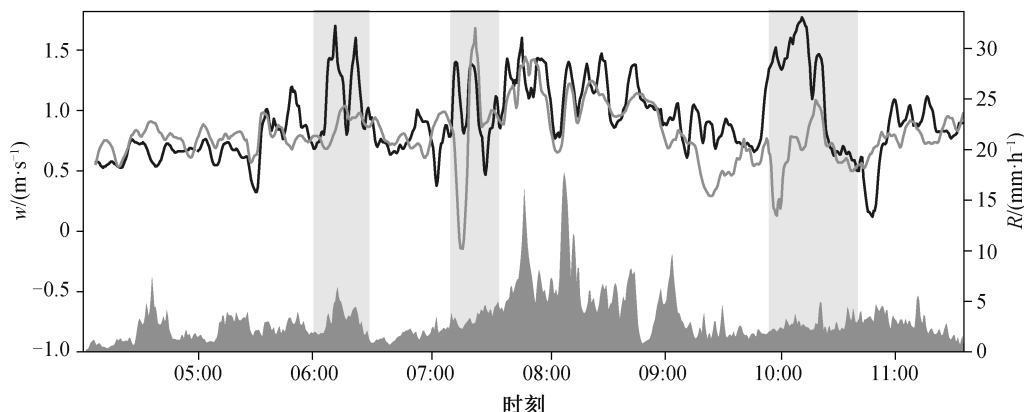
当垂直风速估计结果与观测值一致时,表明环境风的信息在雨滴谱仪的速度谱中有所体现,此时考虑利用估计的垂直风速对速度谱进行修正:

$$v_{\text{d}}=v_{\text{m}}+w, \quad (5)$$

其中, v_{m} 是雨滴谱仪实测落速(m/s), w 是环境垂直风速(m/s), v_{d} 为静止大气下的雨滴落速(m/s)。修正后,找到 v_{d} 所在区间,将 v_{m} 区间的雨滴数移动到 v_{d}

所在区间。对各速度通道进行上述修正后,会直接影响式(3)分母中的 v_j 项,若垂直风速为正值(上升气流),修正后 v_j 增大,该尺度区间雨滴数浓度减小,反之亦然。对上述雨滴谱仪估计的垂直风速与超声风温仪探测结果一致的 1802 条样本进行速度修正,表 4 列出不同垂直风速情况下对部分粒径的雨滴数浓度修正前后的相对偏差(由于上升和下沉气流的统计结果相似,将两者合并)。

修正前后的偏差来自两个方面:1) 测速的改变对雨滴数浓度计算的影响;2) 修正前后质量控制时被判定为异常雨滴数量的变化。可见垂直风速相同时,随粒径增大,修正雨滴垂直速度带来的影响逐渐减小;而对于同一粒径区间,垂直风速越大,对修正值的影响越大,垂直风速大于 0.6 m/s 时,修正雨滴落速对典型尺度(1 mm 左右)雨滴数浓度的影响幅度大于 20%。图 8 中将表 4 的结果扩展至 4.75 mm,可以看出,修正前后小雨滴数浓度差异尤为显著,但直径小于 0.5 mm 的雨滴因受仪器探测灵敏度



黑色和灰色曲线分别代表 280 m 处超声风温仪垂直风速探测值(w_{obs})与雨滴谱仪探测结果的估计值(w_{est}),深灰色阴影区表示分钟平均雨强,浅灰色阴影区表示超声风温仪测得的水平风速大于 10 m/s;图像经过五点平滑处理

图 7 北京 7 月 24 日垂直风速观测值与估计值

Fig. 7 Estimations and observations of vertival wind speed on 24th July in Beijing

表 4 修正前后雨滴谱在各粒径的相对偏差
Table 4 Relative bias between corrected and original RSD in different diameters

$ w /(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	相对偏差/%									
	$D=0.312$	$D=0.437$	$D=0.562$	$D=0.687$	$D=0.812$	$D=0.937$	$D=1.062$	$D=1.187$	$D=1.375$	$D=1.625$
0.4~0.6	22.5	32.6	32.8	25.6	22.5	18.4	12.2	7.1	4.3	1.3
0.6~0.8	32.3	32.5	34.1	34.3	31.4	29.4	21.9	20.5	15.5	8.2
0.8~1.6	52.1	41.5	43.1	47.2	45.2	46.3	35.2	32.6	31.7	21.6
> 1.6	62.6	69.6	63.5	57.2	53.9	52.9	31.2	32.7	35.1	26.3

说明: D 表示雨滴谱仪测得的雨滴直径(mm); 相对偏差均是在进行基本的质量控制(即剔除测速位于理论落速 $\pm 60\%$ 以外的雨滴)后进行雨滴谱计算的结果。

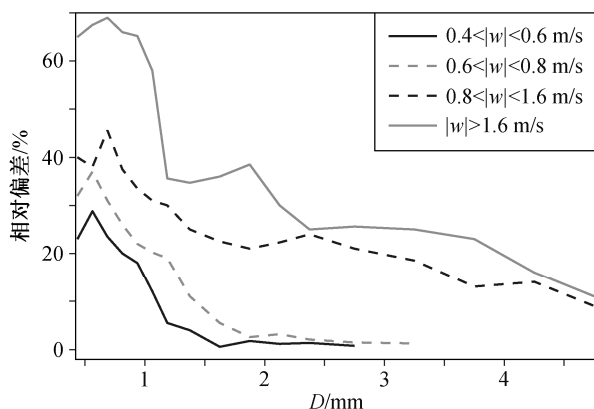


图8 不同垂直风速修正前后雨滴数浓度的相对偏差
Fig. 8 Relative error between corrected and original RSD in different diameters

的影响而参考意义较小。直径大于2 mm的雨滴对应的速度区间更大,垂直风对其影响很小。因此,垂直风对直径1 mm左右雨滴落速的影响最大,且风速越大影响越大。在垂直风速大于1.6 m/s的情况(图8中灰色实线)下,直径小于1 mm雨滴的落速修正前后相对偏差达70%左右。由于这部分数据多数来源于上升气流较强的样本,部分小雨滴呈悬浮状态,因此大量雨滴的测速接近0(对应图4(f)中直径1 mm左右靠近横轴的大值区)。修正前,此部分雨滴作为异常值被剔除;修正后,大量雨滴落入直径-速度关系的理论区间而被保留,带来修正前后的偏差。

基于7月24日06:28—06:40时段280 m处的观测样本,用上述修正方法进行试验。超声风温仪测得平均垂直风速为0.91 m/s,利用速度谱估计得到平均垂直风速为0.98 m/s,二者相近。从图9(a)可见,利用该时段平均垂直风速修正后的雨滴平均速度(图9(b))与理论值的偏差减小,但直径大于3.75 mm雨滴的速度仍有明显偏差;图9(c)中修正前(蓝色)后(红色)的雨滴谱与图8中黑色虚线一致,修正雨滴速度对直径1 mm左右的雨滴数浓度影响最大。进一步计算修正前后的雷达反射率因子 Z 和雨强 R , Z 均值修正前后分别为28.17和27.82 dBZ, R 均值修正前后分别为2.58和2.31 mm/h。由于修正垂直气流对粒径1 mm左右的雨滴数浓度影响最大,而雷达反射率因子为雨滴谱的六阶积分量,因此修正后 Z 的变化幅度小于 R ,使得用于定量反演降水的 Z - R 关系发生变化。因此,在水平风速小于10 m/s时,若降水过程伴随稳定的上升或下沉气流,则可以利用雨滴谱仪观测数据进行估计,但修正雨

滴垂直速度对后续计算雨滴谱及相关谱衍生量有显著的影响。

3.4 水平风对速度谱的影响

水平风对雨滴下落速度的影响较为复杂,难以进行量化的分析。前人从理论上分析雨滴谱的垂直变化时,多假设水平风不存在。Friedrich等^[9]结合超声风温仪的观测,指出分析时应将水平风大的雨滴谱样本直接剔除。本文尝试不借助外部观测,仅用雨滴谱仪观测数据的特征来识别受水平风影响较大的样本。

在环境风大的情况下,搭载Parsivel雨滴谱仪的平台(铁塔)会出现小幅度的低频摆动。因此,即便雨滴谱仪安装稳固,也会跟随塔体有一定程度的摆动,导致激光束与水平面之间出现一定的夹角,此时雨滴穿过激光束的时间将比无夹角时更长,使得测速比实际值偏小。另一方面,即使激光束保持水平状态,雨滴倾斜通过时,观测的落速垂直分量也会与理论值有所偏差,可能导致出现图3(c)中大量低于理论速度值的雨滴。

对于每一个雨滴谱样本,雨滴谱仪采样时间分辨率为1分钟,而这段时间内激光束与水平面之间的夹角并非定值,最终呈现的速度谱也较为分散。本文尝试利用明显受到水平风影响时刻的速度谱特征——分布分散且出现大量偏离理论落速区间的雨滴,依靠原始速度谱识别受到水平风影响的时刻。定义第一个特征量——异常雨滴比例Per:

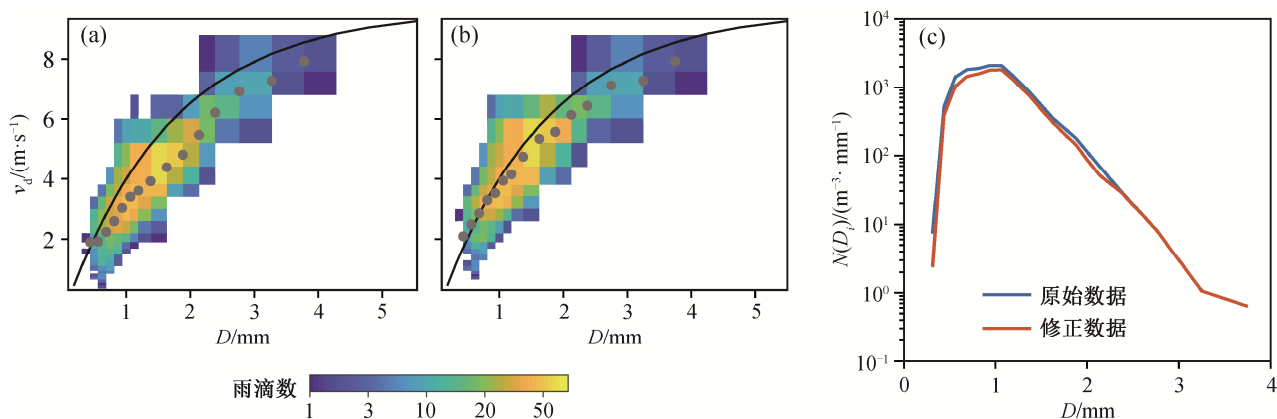
$$\text{Per} = \frac{\sum m_i}{\sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} n_{ij}}, \quad (6)$$

其中, m_i 表示第 i 个直径区间超出Atlas理论落速 $\pm 60\%$ 的雨滴数, n_{ij} 是第 i 个直径区间第 j 个速度区间的雨滴数;分子表示超出理论落速区间的雨滴总数,分母为该样本的雨滴总数。Per即为超出理论落速 $\pm 60\%$ 区间的粒子占比。

在实际观测中,即使水平风速很小,但是当环境垂直风速大于1.6 m/s时,同样会出现大量位于上述区间外的雨滴(如图3(b)中测速接近0的大量雨滴),但此时各直径区间的测速分布依然较为集中。因此,定义第二个特征量——平均标准差 std_v :

$$\text{std}_v = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} n_{ij} (v_j - \bar{v}_i)^2}, \quad (7)$$

其中, k 表示参与运算的直径区间总数,本文取5~21



(a)和(b)分别为原始观测数据和利用该时段平均垂直风速修正平均速度谱的结果,圆点表示各粒径雨滴实测平均速度,黑线为 Atlas 理论落速;(c)修正前后的雨滴谱

图 9 7 月 24 日 06:28—06:40 落速修正前后对比

Fig. 9 Corrected and original RSD between 06:28 and 06:40 on 24th July

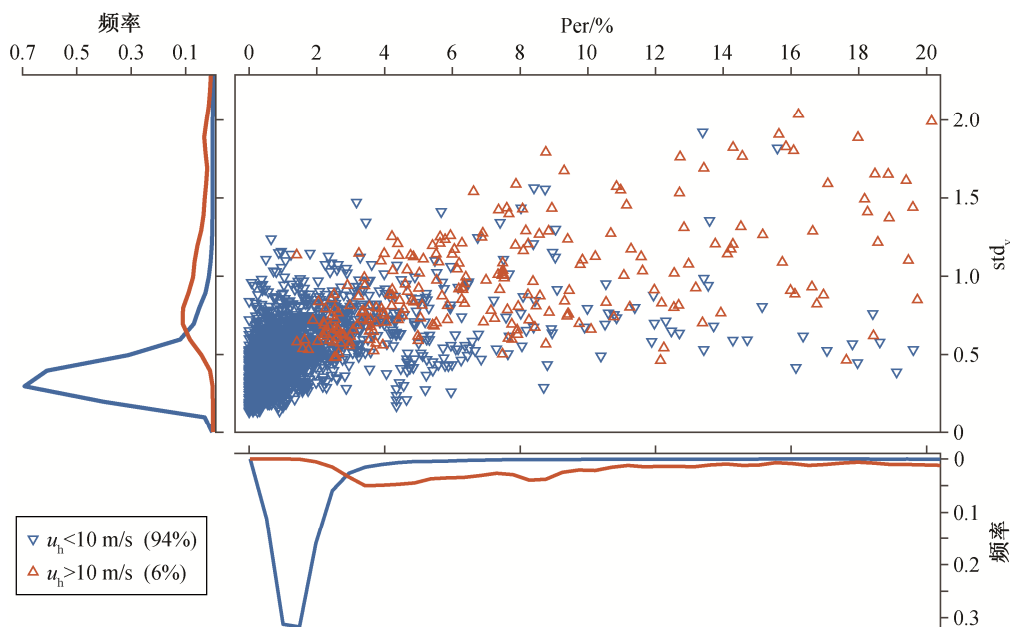


图 10 两类样本的两个统计特征量分布

Fig. 10 Statistics of the two features of the different samples

通道,即 $k=17$; v_j 指第 j 个速度区间的速度; n_i 和 v_i 分别是第 i 个直径区间的总雨滴数和平均落速。式 (7) 的意义是求每个直径区间的所有雨滴落速标准差的均值。 Per 和 Std_v 均在质量控制前计算。

考虑到雨滴数过少时的随机误差,以总粒子数大于 100 个为阈值,在全部样本中满足条件的有 7328 条,以水平风速 10 m/s 为标准对样本进行分类。从图 10 可见,在水平风速大 ($>10 \text{ m/s}$, 占 6%) 与水平风速小 ($<10 \text{ m/s}$, 占 94%) 两种情况下,特征量 std_v 和 Per 的分布有显著的区别。

为便于定量分析,表 5 和 6 分别列出两类样本的特征量均大于某个阈值的样本占比。结合图 10 和表 5 可以看出,90% 以上水平风小的样本,超出理论落速 $\pm 60\%$ 区间的雨滴数仅占 2% 左右,而地面观测中水平风速通常较小,因此使用 Parsivel 雨滴谱仪时,使用 $\pm 60\%$ 的落速阈值作为质量控制标准是可行的,并且处理前后雨滴谱的变化不大;这些样本各粒径区间的速度平均标准差小于 0.6 m/s,说明速度的分布相对集中。结合图 10 和表 6 可以看出,95% 以上水平风较大的样本同时满足超出理论落速

表 5 水平风速小于 10 m/s 的样本占比
Table 5 Statistics of samples with horizontal wind speed less than 10 m/s

Per/%	std _v =0.1	std _v =0.2	std _v =0.4	std _v =0.6	std _v =1.0
0.5	31.2	30.9	21.4	9.6	0.9
1	19.1	18.8	15.4	8.1	0.6
2	9.8	9.7	9.1	5.5	0.5
5	3.5	3.5	3.4	2.3	0.3
10	1.4	1.3	1.2	0.7	0.01

表 6 水平风速大于 10 m/s 的样本占比
Table 6 Statistics of samples with horizontal wind speed more than 10 m/s

Per/%	std _v =0.1	std _v =0.2	std _v =0.4	std _v =0.6	std _v =1.0
0.5	99.8	99.5	96.1	89.2	49.7
1	98.1	97.9	97.6	87.9	43.1
2	86.6	86.6	86.2	81.3	42.9
5	63.1	63.1	62.8	58.9	37.2
10	38.3	38.2	37.9	35.5	26.5

±60%区间的粒子数占 1%以上以及粒径区间的速度平均标准差大于 0.4 m/s 这两个条件,说明水平风大时,测得雨滴落速异常值偏多,且速度分布相对离散。由于两类数据无法完全分离,因此需权衡统计学上的第一类错误和第二类错误^[16]来选择区分标准。若以超出理论落速±60%区间的雨滴数占 2%以上且粒径区间的速度标准差均值大于 0.6 m/s 为标准,则在本文所有样本中可以正确地识别 80%以上水平风速大的情况,同时包含 5%左右的虚警率。

将与 Parsivel 雨滴谱仪探测原理相似的光学仪器架设于易受环境风影响的平台上时,可以参考上述标准识别水平风速大的样本。在这种情况下,受限于采样频率,暂时难以对落速做进一步的修正。因此,在分析雨滴谱时,可预先将识别出来的明显受水平风影响的样本(根据本文统计结果,仅少数雨滴谱仪探测样本伴随较大的环境风)直接剔除。

3.5 讨论

依据式(4)估计垂直风速的方法对本文中 67%的样本有效。但是,雨滴下落时存在动力学碰并和破碎过程,会导致部分雨滴落速观测值偏离理论值,例如碰并形成的雨滴初期落速比理论落速小。同时, Parsivel 雨滴谱仪特殊的分档观测方式也给精细化修正带来误差,因此在实际应用中,这种估计方法对持续的稳定性降水更有效。

除雨滴落速观测值偏离理论值外,由于风的作用,与落速理论值对应的粒径观测值同样会存在偏差,这或许是水平风速小(<10 m/s)时垂直风速估计效果更好(82%一致)的原因之一。当利用雨滴谱仪探测数据估计出的垂直风速与超声风温仪实测值一致时,若将其进一步用于雨滴速度修正,因垂直风对不同直径雨滴落速的影响各异,也会给雨滴落速的修正带来误差。

基于 Parsivel 雨滴谱仪原始观测数据判断环境风的影响时,本文定义的两个特征量的阈值由当地雨滴谱的特性及仪器搭建的环境共同决定。若实际观测中没有风速数据,在质量控制时剔除的雨滴谱探测样本中也可能包含部分并非受水平风影响的结果,导致可用于进一步分析的样本量减少。

4 结论

本文利用架设于 140 m 和 280 m 两个高度的 Parsivel 激光雨滴谱仪和超声风温仪,基于 2018 年 6—8 月北京的多个降雨过程探测数据,讨论环境风对光学原理雨滴谱仪观测的影响,得出以下结论。

1) 将 Parsivel 雨滴谱仪等光学雨滴谱仪架设于高处具有可行性,但由于通常情况下环境风随高度增加而增强,使用其探测数据时,需要在质量控制环节注意环境风的影响。

2) 不同速度的环境垂直风对激光雨滴谱仪探测的速度谱有不同的影响。基于这一差异,可以利用雨滴谱仪实测数据估计环境垂直风速。在水平风速小于 10 m/s 且垂直风速大于 0.4 m/s 时,80%以上的垂直风速估计值与超声风温仪实测值一致。

3) 随着环境水平风速的增大,雨滴速度谱分布特征发生变化,环境水平风速大于 10 m/s 和小于 10 m/s 时,本文定义的速度异常雨滴比例 Per 和平均标准差 std_v 两个特征参数的频率分布有明显差异。借助这两个特征参数,可识别出本文样本中 80%左右水平风速大于 10 m/s 的样本。

考虑环境风对激光雨滴谱仪探测数据的影响,对基于光学原理的雨滴谱仪观测数据进行质量控制后,可进一步分析雨滴谱的垂直分布及其对定量估计降水的影响。本文未就水平风对雨滴谱仪观测的影响进行量化分析,同时,对于未判别出受水平风影响的样本,将测速与理论末速度的偏差归因于垂直风的影响,这会带来一定程度的误差。后续工作中,将对这些问题做进一步的研究。

参考文献

- [1] 陈宝君, 宫福久. 三类降水云雨滴谱分布模式. 气象学报, 1998, 56(4): 506–512
- [2] 万和跃, 濮江平, 刘思瑶. 雨滴谱探测技术发展及应用概述. 科技创新导报, 2015, 12(31): 166–167
- [3] Hu Z, Srivastava R C. Evolution of raindrop size distribution by coalescence, breakup, and evaporation: theory and observations. Journal of the Atmospheric Sciences, 1995, 52: 1761–1783
- [4] 刘晓阳, 杨洪平, 李建通, 等. 新一代天气雷达定量降水估测集成系统. 气象, 2010, 36(4): 90–95
- [5] Joss J, Waldvogel A. Raindrop size distribution and sampling size errors. Journal of the Atmospheric Sciences, 1968, 26(3): 566–569
- [6] 张昊, 濮江平, 李靖, 等. 庐山地区不同海拔高度降水雨滴谱特征分析. 气象与减灾研究, 2011, 34(2): 43–50
- [7] 陈聪, 银燕, 陈宝君. 黄山不同高度雨滴谱的演变特征. 大气科学学报, 2015, 38(3): 388–395
- [8] Barthes L, Mallet C. Vertical evolution of raindrop size distribution: impact on the shape of the DSD. Atmospheric Research, 2013, 119(1): 13–22
- [9] Friedrich K, Higgins S, Masters F J, et al. Articulating and stationary PARSIVEL disdrometer measurements in conditions with strong winds and heavy rainfall. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, 30(9): 2063–2080
- [10] Löffler-Mang M, Joss J. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17(2): 130–139
- [11] Coppin P A, Taylor K J. A three-component sonic anemometer/thermometer system for general micro-meteorological research. Boundary-Layer Meteorology, 1983, 27(1): 27–42
- [12] Pruppacher H R, Beard K V. A Wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drop falling at terminal velocity in air. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1970, 96: 247–256
- [13] Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. Reviews of Geophysics, 1973, 11(1): 1–35
- [14] Jaffrain J, Berne A. Experimental quantification of the sampling uncertainty associated with measurements from PARSIVEL disdrometers. Journal of Hydrometeorology, 2011, 12(3): 352–370
- [15] Kim D K, Song C K. Characteristics of vertical velocities estimated from drop size and fall velocity spectra of Parsivel disdrometer. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, 11(6): 3851–3860
- [16] 林少宫. 基础概率与数理统计. 北京: 人民教育出版社, 1978