

文章编号: 2096-1618(2020)02-0188-07

青藏高原那曲地区云降水微观特征雨滴谱分析

于建宇, 李茂善, 阴蜀城, 吕 钊, 宋兴宇

(成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室 气候与环境变化联合实验室, 四川 成都 610225)

摘要:为探究青藏高原那曲地区夏季云降水的分布特征,利用2014年6月1日–7月31日那曲地区PS-32型地面激光雨滴谱仪所测得的96次降水资料,并依据降水云的性质进行统计分类,运用M-P拟合和Gamma拟合的方法对3类降水云的雨滴谱分布及其微观特征物理量的演变进行分析和检验,得出结果:(1)那曲地区降水以对流云为主;(2)3类云降水的平均雨滴谱谱宽有着明显差异,M-P拟合最适合用于层状云降水分布,Gamma拟合适用于积雨云和积层混合云雨滴谱的分布;(3)3类云降水的雨强贡献均来自大雨滴谱(即直径 $>1\text{ mm}$ 的雨滴)的贡献,其中层状云降水和积层混合云降水的雨强贡献主要来自直径为 $1\sim 2\text{ mm}$ 的雨滴,积雨云降水主的雨强贡献来自直径 $>2\text{ mm}$ 的雨滴。此外,在对流云降水过程中存在雨滴数密度和雨强增大之前,常伴随特大直径降水粒子先出现的现象。

关键词:大气物理学;云微物理;青藏高原那曲地区;雨滴谱;M-P分布;Gamma分布

中图分类号:P426.6

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2020.02.010

0 引言

青藏高原是世界上最大的高原,位于中国西南部,平均海拔高度在4000 m以上,东部地区同秦岭山脉、黄土高原相接壤,西部地区和喀喇昆仑山接壤,东西跨度3000 km,南起喜马拉雅山的南部边缘,北至昆仑山、阿尔金山和祁连山的北部边缘,南北跨度1500 km,总面积大约有250万 km^2 ,整个青藏高原地势险峻,高山大川密布,地形因此极其复杂,被称为地球“第三极”。同时青藏高原还是众多河流的发源地,有着极其丰富的水文资源,众多研究表明青藏高原丰富的水文资源对于中国大气水循环有着重大作用,因此又被称为“中华水塔”。

雨滴谱指的是单位空间体积内不同尺度雨滴的数量随雨滴直径的分布,反映了降水的微观物理过程和不同类型降水云是如何形成降水的过程。雨滴谱的观测作为云和降水物理学的重要观测项目之一,通过地面雨滴谱获得的降水资料,可以分析出降水过程及其演变特征,对进一步研究降水微观物理过程和降水预报有着重要意义。早在1960年,中国就开始了有关雨滴谱的研究,1990年后,有关雨滴谱的研究更是得到了极大的发展,不仅观测方式从早期的滤纸法变为激光雨滴谱仪观测,而且对雨滴谱特征的研究更是有着重大进展,如宫福久等^[3]通过GBPP-100型激光地面雨滴谱仪在沈阳夏季测得降水资料,并对其进行雨滴谱分析,最后指出3类降水云平均雨滴谱谱宽之间的区别。陈宝君等^[4]在

沈阳1994年7–8月同样使用了GBPP-100型激光雨滴谱仪获取降水资料,对3类降水云的雨滴谱进行了M-P分布和Gamma分布拟合分析,给出了分布参数随雨强变化关系。Mario等^[5]在2003–2005年英国Chilbolton地区用Gamma拟合的方法和两种极大值近似法对所获得的降水资料进行拟合。而Atlas等^[6]等则分析了雨滴谱随时间演变的情况,并将观测结果与分析模拟的结果进行了对比,认为雨滴谱对降水的估计比较准确。柳臣中通过成都信息工程大学气象观测场LNM型激光雨滴谱仪获得的2009–2011年175次降水资料进行分析,得到3类云降水的雨滴谱的分布及其物理量的特征。

鉴于此,利用青藏高原那曲地区PS-32型地面雨滴谱仪所测得的观测资料,分析研究了那曲地区3类云降水的雨滴谱微观特征物理量以及雨滴谱的分布演变,以期获得那曲地区3类云降水的雨滴谱及其降水微物理特征的分布演变情况和那曲地区的成雨机制。

1 资料选取和方法介绍

1.1 资料介绍

通过那曲气象局(31.48°N , 92.01°E , 4507 m)在2014年06月01日–07月31日所测得的96次降水雨滴谱仪资料,采样时间分辨率为1 min,总计样本数为2338个。

所用观测仪器为华创风云公司所生产的PS-32型激光雨滴谱仪,该仪器不仅可测得降水粒子的直径和速度,同时还能对降水粒子进行固液分类,准确率高达95%以上。PS-32型激光雨滴谱仪测量的数据共有32个直径通道和32个速度通道,测量的粒子直径为0.2

收稿日期:2019-06-28

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC1505702);国家自然科学基金资助项目(41675106)

~25 mm,粒子速度为0.2~20 m/s。

使用柳臣中对降水云类型的划分方式,根据降水云性质的不同将所得降水资料分为积雨云降水、层状云降水、积层混合云降水 3 类。云型的划分主要根据卫星云图、雷达回波和地面气象观测站的资料。分类时,首先找出 96 次降水的云状观测资料,通过云状的不同将云型简单分类为层状云和积云两种,然后利用卫星云图和雷达回波图的特征,将积云与积层混合云进行区分,人工筛选出积层混合云。在选取雷达回波的过程中,由于雷达回波强度小于10 dBz的资料几乎对降水毫无贡献,或者是贡献极其微小,因此将雷达回波强度小于10 dBz的视为非降水类型雷达回波,将其忽略。而对于大于60 dBz的资料,则按照60 dBz处理,因为少数大雨滴对 Z (雷达反射率)的贡献远大于对 I (雨强)的贡献。积层混合云指在大片深厚层云中间嵌有对流云(或称对流泡),而积云主要由低层空气对流活动产生,因此可以将积云和积层混合云统称为对流云。3 种类型降水统计见表 1 和表 2。

表 1 3 种类型降水的频次统计						
月份	层状云降水		积雨云降水		积层混合云降水	
	频次	比例/%	频次	比例/%	频次	比例/%
6 月	3	9.68	10	32.26	18	58.06
7 月	30	46.15	31	47.69	4	6.16

表 2 3 种类型降水样本统计		
降水云类型	样本数	比例/%
层状云降水	787	33.68
积雨云降水	986	42.17
积层混合云降水	565	24.15

从表 1 可以看出,那曲地区 7 月层状云和积雨云降水频次高于 6 月,7 月积层混合云降水频次低于 6 月,其次 7 月积雨云降水略多于层状云降水,6 月积雨云降水也多于层状云降水,对流云降水高于层状云降水(表 2)。总的来说,7 月降水频次高于 6 月,这与 7 月是高原那曲地区雨季,且对流活动多有关。

1.2 研究方法

许多研究^[7-23]表明 M-P 分布对层状云降水的拟合效果好,而 Gamma 分布则对积雨云和积层混合云降

水的拟合效果好,因此通过 Marshall 等^[8]提出的雨滴谱拟合方法对层状云降水进行分布拟合:

$$N_D = N_0 D e^{-\lambda D} \tag{1}$$

其中: D 表示雨滴直径, $N_0 = 8000 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$, $\lambda = 41 I^{-0.21} \text{ cm}^{-1}$ 。

Gamma 分布则使用 Blanchard 指出的对流云降水的拟合公式进行拟合,其公式为

$$N_D = N_0 D^\mu e^{-\lambda D} \tag{2}$$

其中: D 表示雨滴直径, $N_0 = 8000 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$, $\mu = 2.50$, $\lambda = 41 I^{-0.21} \text{ cm}^{-1}$ 。

2 结果分析

2.1 雨滴谱的特征物理量的平均值

表 3 为选取的 4 种具有代表性的特征直径,分别是平均直径 D_m ,最大直径 D_{max} ,均立方根直径 D_v ,中数体积直径 D_n (D_n 表示降水强度的一半是大于该直径的雨滴所产生的)。除了特征直径,还需要计算的微观特征物理量有:雨滴数密度 N 和雨强 I 。图 1 则为 3 类降水的数密度百分比分布图,从图 1 可以看出,层状云密度数百分比在雨滴谱粒子半径0.7 mm时达到最大,为 28%,积雨云密度数百分比粒子半径比较小,而积层混合云密度数百分比最大值在粒子半径为1.7 mm。

表 3 3 类云降水微物理量特征参数的平均值						
降水云类型	D_m / mm	D_{max} / mm	D_v / mm	D_n / mm	$N / (\text{mm}^{-3} \text{ mm}^{-1})$	$I / (\text{mm/h})$
层状云	0.61	3.2	0.82	1.29	462	2.095
积雨云	0.48	8.6	0.69	1.81	9172	22.57
积层混合云	0.51	6.8	0.75	1.46	3939	12.15

通过表 3 可以看出对流云降水中的雨滴数密度明显大于层状云降水的。通过平均雨强可以发现,对流云降水的雨强也明显大于层状云降水的,其中积雨云降水的平均雨强最大。这是因为对流云中雨滴数密度和大雨滴的数量明显多于层云所造成的。直径方面,虽然对流云的最大直径比层状云的大,但对流云的平均直径却小于层状云的,通过中数体积直径 D_n 可以发现,3 类云降水的雨强均是由直径超过1 mm的雨滴产生。

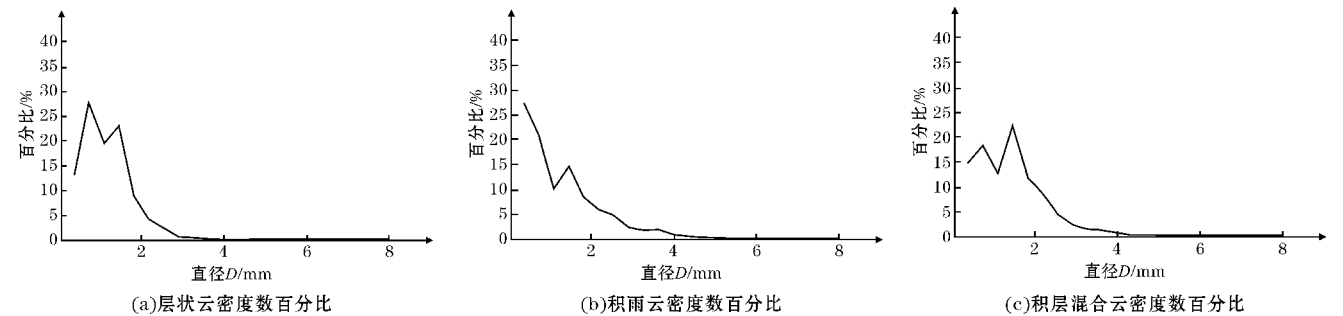


图 1 3 类降水数密度百分比

2.2 平均雨滴谱图

通过图 2 的 3 类云降水的平均雨滴谱,可以明显看出,层状云降水雨滴谱的分布比较窄,最大雨滴直径仅为3.2 mm,同层状云降水分布相比,积雨云和积层混合云的雨滴谱分布则相对较宽,积雨云降水的最大雨滴直径为8.7 mm,积层混合云降水的最大雨滴直径为6.8 mm,同时可以看出图 2 在对流云的直径大于 3 mm后有着明显的波动起伏,呈现出多峰结构,这与层状云降水的单峰有着明显的差异。在观测的对流云的 1551 个样本中,发现在直径为6 mm以上的雨滴有 102 个,7 mm以上的有 38 个。在 1962 年夏季的泰山雨滴谱观测中就有人发现这种特大雨滴,而在这之前,W. A. Bentley 于 20 世纪初就已经观测获得并指出这种直径大于8 mm的雨滴的存在。因此,根据这种雨滴数密度随直径的分布特征可将降水类型分类。其次,从图 2 的分布曲线可以发现,积云在上,层云在下,积层混合云在二者之间。这说明了各个尺度的雨滴数密度积雨云最多,积层混合云次之,层状云的最少。3 类云降水在直径为 0 ~ 0.4 mm,雨滴数密度有着明显差异,这说明对流降水的小雨滴数量明显多于层状云降水的小雨滴数量,在直径为0.4 ~ 3.2 mm,对流云降水和层状云降水的雨滴数密度迅速增大,在直径3.2 ~ 8 mm已经没有了层状云的雨滴,同时积雨云降水和积层混合云降水的雨滴数密度差距也增大。这是因为雨滴数密度的变化体现了云内雨滴增长方式,对流云中云滴和水滴碰撞增长,产生了大量大直径的雨滴,同时由于大雨滴之间相互碰撞而破碎,

因此产生了大量的小雨滴。此外,从图 2 可以发现 3 类云降水的雨滴谱均有峰值出现,关于雨滴谱的峰值,刘红燕等^[18]认为峰值的存在反映了降水的不稳定性,这说明大多数的降水都有着不稳定过程;同时还可以发现,在对流云降水中,不仅雨滴谱的峰值特征比层状云的明显很多,而且雨滴谱峰值的个数也多了很多,这表明对流云降水比层状云降水更不稳定,其中以积层混合云的峰值特征最为明显,因此认为积层混合云是最不稳定的降水类型。除此之外,在0.6 mm的降水直径处 3 类云均出现了谷值,产生这种现象的原因还有待于进一步研究。最后,对图 2 雨滴谱的谱形进行分析后发现,层状云的谱形在整体上都比较符合指数分布。积层混合云的谱形在0.3 ~ 3 mm也比较符合指数分布,但在大于3 mm之后,明显偏离了指数分布。除层云降水外,对流云的谱形与指数分布有着较大差异,不仅大雨滴多出很多,而且小雨滴也同样多出很多,因此这里通过对 3 类云降水的雨滴谱采用最小二乘法分别进行 Gamma 分布和 M-P 分布的拟合检验,得出相应的参数,结果如表 4 所示。

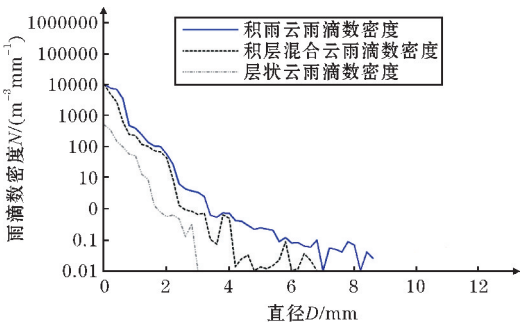


图2 3类降水云的平均雨滴谱

表 4 3 类云降水 M-P 分布和 Gamma 分布参数

降水类型	M-P 分布		Gamma 分布		μ
	$N_0/(m^{-3}mm^{-1})$	λ/mm^{-1}	$N_0/(m^{-3}mm^{-1})$	λ/mm^{-1}	
层状云	417.63	3.41	927.84	3.44	0.83
积雨云	168.42	1.17	203.06	0.21	-2.24
积层混合云	542.66	2.28	109.47	1.13	-3.26

通过 Gamma 分布和 M-P 分布对雨滴数密度和雨强值进行拟合计算,并与实际结果进行对比,结果如表 5。从表 5 看出,虽然层云降水在两种分布中得出的雨滴数密度与雨强值和实际数值都较为接近,但雨滴数密度值在 M-P 分布中和实际值相比误差比 Gamma 分布的小,而且更符合实际,说明 M-P 分布适合对层状云降水进行拟合分析。积雨云在 Gamma 分布中计算出的值与实际观测值十分接近,而在 M-P 分布中计算

出的值与实际观测值有着较大误差,这说明 Gamma 分布更适合表示积雨云分布。积层混合云不论 Gamma 分布还是 M-P 分布计算的值都与实际观测值有一定的误差,但是 Gamma 分布的误差更小。因此用 Gamma 分布表示积层混合云分布更适合。总而言之,3 类云都可以用 Gamma 分布进行表示,但是对流云适合用 Gamma 分布,层状云适合用 M-P 分布。

表 5 3 类云降水 M-P 分布和 Γ 分布的拟合检验

降水类型	M-P 分布		Gamma 分布	
	N/m^{-3}	$I/(\text{mm}/\text{h})$	N/m^{-3}	$I/(\text{mm}/\text{h})$
层状云	447.93	1.42	395.51	1.71
积雨云	613.54	37.26	5372.25	25.12
积层混合云	965.95	8.17	15364.47	6.34

2.3 不同雨滴对降水的贡献率

为了揭示不同直径雨滴对降水贡献的差异,用直径大小的不同将雨滴划分为 3 类:0 ~ 1 mm,1 ~ 2 mm,

和大于 2 mm,与之相对应的数密度和雨强分别记为: n_1, n_2, n_3 和 I_1, I_2, I_3 。(贡献率是指不同级别的数密度和雨强相对于总数密度和雨强的比例,计算结果如表 6 所示。

表 6 不同雨滴对数密度及雨强的贡献率 单位: %

降水类型	n_1/N	n_2/N	n_3/N	I_1/I	I_2/I	I_3/I
层云降水	78.4	13.63	7.97	24.2	71.84	3.96
积云降水	89	8.68	2.32	8.7	46.48	44.82
积层混合云降水	85.4	12.16	2.44	17.6	56.64	25.76

由表 6 可以发现,3 类云降水的雨强贡献主要来源均为直径大于 1 mm 的大雨滴。其中,层状云的降水雨强主要由直径 1 ~ 2 mm 的雨滴贡献,其贡献比例为 71.84%,与此相对应的雨滴数密度比例则为 13.63%。这不仅与表 3 中数体积直径 D_n 所得数据一致,且同其他研究所得到的数据较为相符;积雨云降水的雨强贡献中大雨滴作用也同样明显,0 ~ 1 mm 雨滴的雨强贡献只有 10% 不到,1 ~ 2 mm 雨滴的贡献比例为 46.48%,于此相对应的雨滴数密度比例仅有 8.68%,而大于 2 mm 的雨滴贡献比例为 44.82%,与之相对应

的雨滴数密度比例却不到 3%。在积层混合云降水中,1 ~ 2 mm 雨滴对雨强的贡献高达 56.64%,而对应的雨滴数密度比例只有 12.16%。

表 7 为 3 类云降水不同类别雨滴贡献率的偏差,通过表 7 可知,在 0 ~ 1 mm 直径范围内的小雨滴,3 类云降水的贡献率偏差都很小,这说明不论何种类型的降水过程中,小雨滴的贡献偏差很小。但随着雨滴直径的增大,可以轻易看出,不仅雨滴数密度比例偏差增大,同时雨强贡献率的偏差也随之增大,这表明在不论何种降水中小雨滴的比例都是稳定的。

表 7 不同类别雨滴贡献率的偏差 单位: %

降水类型	n_1/N	n_2/N	n_3/N	I_1/I	I_2/I	I_3/I
层云降水	6.38	90.96	196.23	36.93	89.82	172.65
积云降水	5.64	38.31	106.66	77.62	37.46	65.37
积层混合云降水	6.11	48.33	98.73	66.47	27.22	92.14

2.4 雨滴谱的时间演变

征量随时间的变化,变化的物理量有雨强 I ,雨滴数密度 N ,雨滴直径 D 。

图 3 为 3 类降水云的实时降水过程中微观物理特

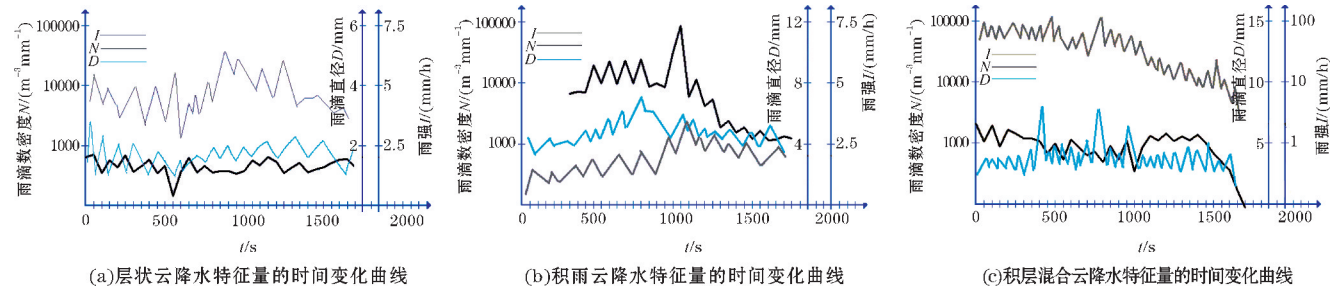


图 3 3 类降水云降水特征量的时间变化曲线

不同类型的降水有着不同的特征,而在同一次降水过程,在其发展的过程中其微观物理特征量也会随之变化。从图3可以明显得知,3类云降水的雨滴数密度 N 和雨强 I 每时每刻都在不停地变化并且属于同位相变化,峰值的出现也基本一致。直径 D 随着雨强 I 和雨滴数密度的增强而增大,但不具有同位相变化的趋势。从图3可以看出,在 N 和 I 增大之前的短时间内, D 有着非常迅猛的增长,这说明雨滴的突然增大可以视为强降水到来的前兆,这与王鹏飞等^[23]的结论相符。通过3类云降水的特征量随时间变化曲线的对比,发现积层混合云的雨强波动幅度最为大,积云的雨滴数密度波动幅度最大。图3(c)与图3(a)、图3(b)进行对比后可以发现,积层混合云降水的波动频率远

高于积雨云降水和层状云降水的波动频率,这说明积层混合云降水不稳定,这与刘红燕^[18]的结论相符。在500~1000 s这个时间段,可以发现雨强 I 、雨滴数密度 N 和雨滴直径 D 同时增大,因此认为,雨强 I 是在雨滴数密度 N 和雨滴直径 D 的共同作用下增大。

2.5 3类云降水雨滴谱的分布演变

图4和图5分别为积雨云降水和积层混合云降水的雨滴谱分布演变图,由于积层混合云降水最开始表现为层状云降水,且层状云的雨滴谱分布较窄,只具有单峰结构,因此将层状云的雨滴谱放在积层混合云中进行分析,并着重分析了对流云的雨滴谱分布演变。

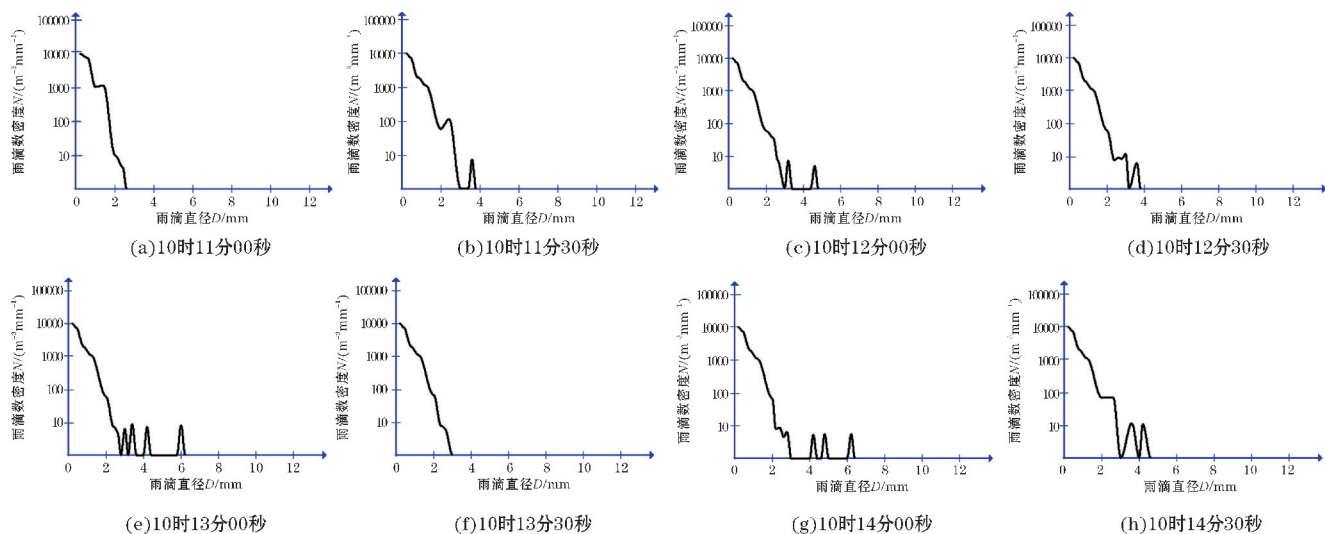


图4 积雨云的降水雨滴谱的分布演变

图4选取积雨云降水前后时刻(7月17日10:11–10:15的积雨云降水资料)来进行分析雨滴谱的分布演变(时间间隔30 s)。从图4(a)可以发现,开始时,雨滴谱的分布基本符合指数分布,且不具有明显峰值。而从图4(b)开始则有明显的起伏出现,与此伴随着少量的大雨滴出现。这表现在两个方面,一方面表现在雨滴谱图主体(即连续不间断的部分)往大水滴方向逐渐开始移动,同时在大水滴一方表现为多峰结构;另一方面则表现为小于0.4 mm的小水滴大量增加,导致图4(e)样本的雨强突增至28.6 mm/h。随后谱宽变窄,图4(f)基本回到图4(a)的情形。用时仅为3 min,并且从测出最大直径雨滴到雨强出现峰值不到1 min。随后在图4(g)上又有少量大雨滴出现,最大雨滴直径为6.4 mm,同时1~3 mm雨滴数量减少。之

后雨滴谱主体又开始往大雨滴方向移动,表现为多峰结构,且小雨滴部分增大至原来的3倍,致使雨强达到了38.22 mm/h。雨滴谱通过这种周期循环的方式不断重复,在出现大雨滴的时候,小雨滴数量锐减,这说明了大雨滴是由小雨滴和较大雨滴碰撞形成的。在出现少量的大雨滴之后,雨滴谱主体往大雨滴方向移动,表现为多峰结构和小雨滴数量倍增(大雨滴碰撞破碎形成小雨滴,致使小雨滴倍增)。结合上文计算的各个尺度雨滴对雨强的贡献,在积雨云降水中,对雨强贡献最大的是1~2 mm的雨滴,对雨强贡献约为46.48%,其次则是大于2 mm的雨滴,对雨强的贡献约为44.82%,这与其他地区(南京)的雨滴谱物理量演变较为相符。

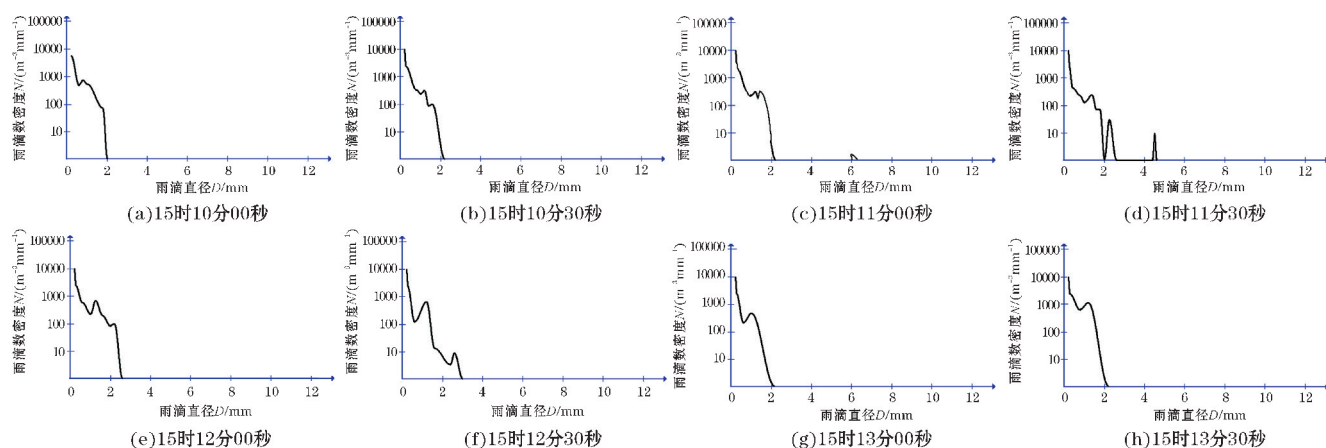


图5 积层混合云的雨滴谱分布演变规律

图5为积层混合云雨滴谱演变实况图(时间间隔30 s),降水资料取自于7月9日15:10~15:14的降水样本,用来说明降水前后雨滴谱的演变。在图5(a)的0.6~0.75 mm有着微弱的峰值存在,且最大降水粒子直径不到2 mm。在图5(b)的1.6~1.8 mm之间有第二个峰值出现,在图5(c)中大于6 mm出现了少量大雨滴,同时,雨滴谱主体开始往大雨滴方向移动,降水强度随之增大,在图5(d)中,有非常明显的大雨滴峰值出现,雨滴谱主体拓宽至2.8 mm,瞬时雨强高达38.6 mm/h,并伴随着大雨滴出现,小雨滴开始减少,这是因为小雨滴碰撞合并的作用,形成大雨滴。之后的雨强都比较大,在18.3~22.6 mm/h,雨滴谱的分布见图5(d)或者图5(e)。综上所述,可以发现在积层混合云降水中,当大雨滴数量开始增多时,雨滴谱分布也变得较为宽阔,且雨强也随之增大,这可能是因为积层混合云中对流泡碰撞合并导致,而从图5(f)开始,雨滴谱主体往小雨滴方向移动,到图5(g)和图5(h)则与图5(a)非常相似,如此反复循环。再结合上文中各个尺度雨滴对雨强的贡献,可以发现积层混合云降水中,1~2 mm的雨滴对雨强贡献最大,贡献比例约为56.64%,其次为大于2 mm的雨滴,其贡献率约为25.76%。

3 结论

通过对2014年6月1日~7月31日青藏高原那曲地区的雨滴谱资料的分析,同时对3类云降水的雨滴谱分布演变分析,得出如下结论:

(1)在青藏高原那曲地区,3类云降水的平均雨滴谱谱宽有着明显差异,层状云的雨滴谱分布较为狭窄,最大雨滴直径仅为3.2 mm,而对流云的雨滴谱相对较宽,积雨云和积层混合云的雨滴谱分布则相对较宽,积雨云降水的最大雨滴直径为8.6 mm,积层混合云降水的最大雨滴直径为7 mm。在0~0.2 mm的直径区间内和直径大于3.2 mm后对流云的雨滴数密度均大于层状云的。

(2)通过对雨滴谱分析后,发现只有层状云的谱

形在整体上都比较符合指数分布,而积层混合云的谱形在0.3~3.2 mm也比较符合指数分布,在M-P分布拟合中 N 和 I 成正线性相关, λ 和 I 成负线性相关,在Gamma分布拟合中, N 、 λ 均和 I 成负线性相关。M-P拟合方式最适合对层状云降水进行分布拟合,Gamma拟合的方式适合对积雨云和积层混合云雨滴谱进行分布拟合。

(3)通过对雨滴谱微观特征物理量的分析,层状云降水的雨强贡献主要来自直径1~2 mm的雨滴,它对雨强的贡献比例为71.84%。在积雨云降水的雨强贡献中,直径为1~2 mm雨滴的雨强贡献比例为46.48%,直径大于2 mm的雨滴对雨强的贡献比例为44.82%。在积层混合云降水中,直径为1~2 mm的雨滴对雨强的贡献比例为56.64%。

致谢:感谢成都信息工程大学科研基金项目(KYTZ201721)对本文的资助

参考文献:

- [1] 徐祥德,陶诗言,王继志,等. 青藏高原—季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系[J]. 气象学报,2002,60:257-266.
- [2] 安英玉,金凤岭,张云峰,等. 地面雨滴谱观测的图像自动识别方法[J]. 应用气象学报,2008,19(2):188-193.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Mario M, Frank S M, Gianfranco V. Analysis and Synthesis of Raindrop Size Distribution Time Series From Disdrometer Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2008,46(2):466-478.
- [6] Atlas D, Carlton W, Ulbrich. An observationally based conceptual model of warm oceanic convective rain in the tropics[J]. Journal of Climate and

- Applied Meteorology, 2000, 39(12): 2165–2181.
- [7] Ulbrich C W. Effect of size distribution on variations on precipitation parameters determined by dual-measurement techniques [J]. Preprints of 20th Conf. Radar Meteorology, Boston, Amer Meteor Soc, 1981: 276–281.
- [8] Marshall J Sand, Palmer W M. The distribution of raindrops with size [J]. J Meteor, 1948, 5: 165–166.
- [9] 袁冬梅, 濮江平. 不同云状降水雨滴谱的特征分析 [C]. 中国气象学会 2007 年年会人工影响天气科技进展与应用分会场论文集, 2007.
- [10] Willis Paul T. Functional fits to some observed drop size distributions and parameterization of rain [J]. J Atmos Sci, 1984, 41: 1648–1661.
- [11] Yano K, Nakaguchi D M. Characterization of raindrop size distributions. Preprints of Conf. Cloud Physics and Atmospheric Electricity [J]. Issaquah, Amer Meteor Soc, 1978(2): 154–161.
- [12] 严采繁, 陈万奎. 对流层下部雨滴谱分布应用 [J]. 气象学报, 1990, 2(1): 191–198.
- [13] 张乐坚, 储凌, 叶芳, 等. 使用雷达回波三维信息自动识别降水类型的方法 [J]. 大气科学学报, 2012, 35(1): 95–102.
- [14] Rutledge S A, Houze R A. A diagnostic modeling study of the trailing stratiform region of a midlatitude squall line [J]. J Atmos Sci, 1987, 44(18): 2640–2656.
- [15] Houze R A. Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1997, 78(10): 2179–2196.
- [16] 周毓荃, 刘晓天, 周非非, 等. 河南干旱年地面雨滴谱特征 [J]. 应用气象学报, 2001, 12(增刊): 39–47.
- [17] 宫福久, 何友江, 王吉宏, 等. 东北冷涡天气系统的雨滴谱特征 [J]. 气象科学, 2007, 27(4): 365–373.
- [18] 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的特征 [J]. 大气科学, 2006, 30(4): 693–702.
- [19] 阮忠家. 泰山两次雷雨云降水微结构的一些特征 [G] // 我国云雾降水微物理特征的研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1965: 49–61.
- [20] Bentley W A. Studies of raindrops and raindrop phenomena [J]. Mon Wea Rev, 1904, 32: 450.
- [21] 杨俊梅, 王星星, 封秋娟, 等. 山西汾阳地区层状云和对流云降水雨滴谱特征 [J]. 干旱气象, 2017, 35(3): 439–445.
- [22] 阮征, 吴志根. 风廓线仪探测降水云体结构方法的研究 [J]. 应用气象学报, 2002, 13(3): 330–338.
- [23] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 1989: 406–408.

Analysis of Cloud Precipitation Microscopic Characteristic Raindrop Spectrum in Nagqu Area of Qinghai-Tibet Plateau

YU Jianyu, LI Maoshan, YIN Shucheng, LV Zhao, SONG Xingyu

(College of Atmospheric Sciences/Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province/Joint Laboratory of Climate and Environment Change, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: To explore the distribution characteristics of precipitation of Qinghai-Tibet Plateau Nagqu area in summer cloud, 96 precipitation data measured by PS-32 ground laser raindrop spectrometer in Naqu area from June 1 to July 31, 2014 are applied and classified according to the characteristics of the precipitation cloud into statistical classification. The M-P distribution and Gamma distribution method are utilized to analyze and test the three kinds of precipitation clouds raindrop spectrum distribution and the evolution of the microscopic characteristics of physical quantity and the results suggest that: (1) the rainfall in Nagqu area is dominated by convective clouds; (2) the average raindrop spectral width of the three types of cloud precipitation is obviously different, M-P distribution is most suitable for the distribution of stratiform cloud precipitation, while Gamma distribution is suitable for the distribution of cumulonimbus cloud and cumulonimbus mixed cloud droplet spectra; (3) the rain intensity contribution of the three types of cloud precipitation is all from the large raindrop spectrum (Raindrops larger than 1mm in diameter), among which the rain intensity contribution of stratiform cloud precipitation and stratiform mixed cloud precipitation mainly comes from raindrops with a diameter of 1–2 mm, while the rain intensity contribution of cumulonimbus precipitation mainly comes from raindrops with a diameter of more than 2mm. In addition, in the process of convective cloud precipitation, before the increase of the rain drops density and rain intensity, often accompanied by the phenomenon that the precipitation particles with large diameter first appear.

Keywords: atmospheric physics; cloud microphysics; Nagqu region of Qinghai-Tibet Plateau; raindrop spectrum; M-P distribution; Gamma distribution