

青藏高原东部玉树地区雨滴谱特征 及云微物理结构分析

舒磊¹ 李茂善¹ 华生² 索朗江措² 吕钊¹ 伏薇¹ 王灵芝¹ 阴蜀城¹

(1 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/气候环境变化联合实验室, 成都 610225;

2 昌都市气象局大气探测中心, 昌都 854000)

摘要: 利用青藏高原东部玉树地区的雨滴谱仪和云雷达观测资料, 研究了高原东部地区三类云降水微物理特征参量并且拟合出积雨云降水、混合云降水和层状云降水的雨滴谱分布参数, 拟合分析参数斜率因子 λ 与形状因子 μ 之间的关系。研究不同雷达反射率因子 Z 和降雨强度 R 的关系, 分析Ka波段云雷达观测下三类降水云的结构特征。得到的结论如下: 玉树地区主要降水类型为层状云降水, 降雨量小, 持续时间短, 降雨次数多; 三类云降水在玉树地区的Gamma分布拟合模拟较好的粒径在0.562~5.5 mm; 利用 μ - λ 的经验关系分析, 层状云雨滴谱浓度分布中小粒径占主要贡献且谱宽最窄, 而混合云与积雨云的雨滴谱浓度分布主要贡献粒径分布均匀且谱宽较宽; 对三类云降水进行了 Z - R 关系拟合, B 值从积雨云、混合云到层状云是逐渐递减的, 有助于参数本地化; 云雷达分析降水结构, 积雨云和混合云发生发展旺盛, 最高云高可达13 km, 但混合云降水平均持续时间短于积雨云; 层状云发展较为平稳, 云高在6~7 km, 平均降水持续时间最短。

关键词: 雨滴谱, Gamma分布, 参数化, 玉树地区

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.04.016

Statistical Characteristics of Raindrop Size Distribution and Microphysical Structure of Cloud in Yushu Region of Qinghai Tibet Plateau

Shu Lei¹, Li Maoshan¹, Hua Sheng², Suo Langjiangcuo², Lyu Zhao¹, Fu Wei¹, Wang Lingzhi¹, Yin Shucheng¹

(1 School 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

2 Atmospheric Detection Center of Changdu Meteorological Bureau, Changdu 854000)

Abstract: Based on the data of raindrop spectrometer and Ka-band millimeter wave cloud radar in Yushu area, Eastern Qinghai Tibet Plateau. The microphysical characteristic parameters of three types of cloud precipitation in the eastern plateau are studied, and the raindrop spectrum distribution parameters of cumulonimbus precipitation, stratocumulus precipitation and stratiform cloud precipitation are fitted, and the relationship between the slope factor λ and the shape factor μ is analyzed. The relationship between different radar reflectivity factors Z and rainfall intensity R is studied, and the structural characteristics of three types of precipitation clouds observed by Ka-band millimeter wave cloud radar are analyzed. The conclusions are as follows: the main precipitation type in Yushu area is stratiform cloud precipitation, which has small rainfall, short duration and more rainfall frequency; the Gamma distribution of three types of cloud precipitation in Yushu area is well simulated, and the particle size range is 0.562-5.5 mm; the empirical relationship of μ - λ is used to analyze the distribution of stratiform cloud raindrop spectral concentration, which mainly contributes to the small particle size and the narrowest spectral width, while the mixed precipitation The results show that the distribution of raindrop spectral concentration of cloud and cumulonimbus is mainly contributed by uniform particle size distribution and wide spectral width. Z - R relationship fitting is carried out for the three types of cloud precipitation, and the fitting b value is decreases gradually from cumulonimbus, stratocumulus to stratiform cloud, which is helpful for parameter localization. Cloud radar analysis of precipitation structure shows that cumulonimbus and stratocumulus are developing vigorously, with the highest cloud height up to 13 km, but the stratocumulus precipitation lasts for an average of 12 km The average precipitation duration is the shortest when the cloud height is 6-7 km.

Keywords: raindrop size distribution, Gamma distribution, parameterization, Yushu region

收稿日期: 2020年8月31日; 修回日期: 2021年4月28日

第一作者: 舒磊(1995-), Email: shulei30655671@163.com

通信作者: 李茂善(1971-), Email: lims@cuit.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1505702);

第二次青藏高原综合科学考察研究项目

(2019QZKK0103); 国家自然科学基金项目

(41675106); 成都信息工程大学科研基金项目

(KYTZ201721)

0 引言

云-降水物理过程的观测在研究天气变化和参数化模拟等方面都具有重要意义。云中微物理过程复杂并且多种因素综合作用下产生了雨滴，它在不同经纬度、不同海拔高度、不同降雨类型下变化很大^[1-4]。青藏高原位于中国西南部，平均海拔高度超过4000 m，覆盖面积超过300万 km²，是世界上海拔最高、面积最大的高原。从2014年第三次青藏高原大气科学试验外场观测全面展开以来，研究人员取得了阶段性进展。该项目目前已完成2014年云降水物理过程外场观测试验，并同步开展地面雷达和加密探空观测，获得高原地区多种云降水综合观测数据。

在研究云-降水的微物理机制以及宏观结构特性时，架构简单、数据稳定的雨滴谱分布，是人们重点获取的微物理参量之一。雨滴谱分布描述了单位体积空气、单位尺度间隔内的雨滴个数，是反射率因子、降雨率及液态含水量的计算中最为关键的信息。雨滴谱直接反映了在云降水中碰撞、合并、破碎的降水粒子在下落过程中的增长和演变，揭示了云滴向雨滴转化形成降水过程的转化过程的机制，为云降水的微物理机制和动力过程提供参照，对云-降水物理过程研究和提高参数化模拟水平都有重要意义。宫福久^[5]和陈宝君等^[6]利用3个典型的积雨云、层状云和积层混合云降水的雨滴谱资料研究三类云降水的不同，发现层状云雨滴谱比较窄，呈指数分布，积雨云和积层混合云降水谱宽，且在大水滴一方呈多峰结构；王可法等^[7]利用 Parsivel激光雨滴谱仪连续观测太湖地区自然降水，发现对流云降水采样的粒子谱数据常常包含有少数异常高、低数据。指出实际观测中的少数小粒子有极大下落速度，主要原因是对流云降水容易产生部分小雨滴粒子，其散射吸收能力较弱并且入射激光可能衍射或透射造成，而个别较低速度的大粒子主要是由仪器测量中雨滴重叠所造成。

云物理研究指出，雨滴谱分布一般呈指数分布。Marshall和Palmer^[8]得出的表达式为：

$$N(D) = N_0 e^{-\lambda D}, \quad (1)$$

其中： $N(D)$ 为雨滴密度分布函数， N_0 和 λ 为两个参数，并且 λ (cm⁻¹)和雨强 R (mm/h)有如下关系： $\lambda = 41R^{-0.21}$ ， N_0 为常数，为8000 m⁻³/mm。由于M-P分布具有一般雨滴谱的共同特点，从而得到广泛应用；Takeuchi^[9]、Ulbrich^[10]和Willis^[11]分别用 Γ 分布拟合实际谱，通过和M-P分布对比分析，发现 Γ 分布大大提高了在小滴和大滴区段的拟合精度；熊飞麟^[12]利用激光雨滴谱资料，研究了估算雨滴谱Gamma分布三参数

的阶矩法，提出一种新矩量组合 M_{036} 矩量组合分别代表雨滴数浓度，液态水含量和雷达反射率因子三个物理量，使得计算方便物理意义清晰。并且在实际应用中若能通过探测手段获得三个矩量，就能通过这一矩量组合反演得到云中雨滴谱；霍朝阳等^[13]通过对雨滴谱Gamma拟合多种方法的比较并结合C-FMCW雷达对降水系统垂直结构的精细反映，获得了对复杂降水过程进行精确到分钟的降水类型分辨能力，精确反演降水方面得到很大的提高；张洪胜等^[14]，根据南京地区雨滴谱观测资料，利用改进Gamma分布研究了南京地区降水雨滴谱拟合模型的参数特征发现 μ 和 λ 间存在较好的二项式关系；于建宇等^[15]，利用那曲地区型地面激光雨滴谱仪的降水资料运用M-P拟合和Gamma拟合的方法，得到三类云降水的雨强贡献均来自于大雨滴谱（即直径大于1 mm的雨滴）；Mehta Shyam^[16]利用中距离微雨雷达（MRR-2）观测得到雨滴尺寸分布（DSD）随高度和雨速的数据。并且提出了一种新的Gamma雨滴谱分布（DSD）模型。运用指数分布、对数正态分布和Gamma分布等不同的DSD模型对观测数据进行拟合。结果发现无论是低阶矩还是高阶矩，拟合结果都具有Gamma DSD的特性。

降水云的种类繁多，并且云降水发生以及分布具有不确定性，导致对降水的研究变得复杂且庞大。目前主要的研究内容可以分为两个部分：宏观的结构特征、微观的物理特征。潘晓等^[17]夏季高原降水主要以深厚对流降水为主（67.8%），浅薄降水次之（26.4%），深厚强对流降水出现最少（5.8%）；常祎等^[18]利用2014年7月1日—8月31日期间在西藏那曲的观测数据发现高原雨滴谱分布相对于同纬度和季节的平原地区较宽，导致高原对流产生降水；杨俊梅等^[19]对山西汾阳地区2次降水进行分析，通过太原站多普勒雷达回波的强度大小，把雷达回波<25 dBz判断为层状云降水，回波强度>35 dBz判断为对流云降水。

就目前国内外研究进展来看，高原地区的云降水物理过程主要是从天气分析统计还有数值模拟试验两方面进行研究，典型的天气个例用常规观测资料、再分析资料还有卫星资料等。高原地区高海拔、自然条件恶劣，对高原云降水物理过程的观测资料匮乏，缺少有效的高分辨率资料，对高原云降水微观参数特征和精细化结构的研究较少，对高原云降水的分类的研究有限，远远不能满足科学研究和实际应用的要求。本文使用数据来自“第三次青藏高原气象科学试验”和青藏高原云-降水物理过程及大气水循环的观测和

机理研究中获取的观测资料, 由于加入激光雨滴谱仪器、Ka毫米波云雷达、微波辐射计和飞机观测使得观测技术手段与以往相比更全面观测技术手段与以往相比更全面、可靠, 更能有效的揭示青藏高原地区大气动力过程对云微物理过程的影响, 深入了解高原降水造成的微物理参数特征。对改进模式云物理过程参数化, 提高数值预报水平具有重要意义。

1 资料与方法

本文所使用的雷达资料是2019年7月2日—8月31日在青海玉树市气象局观测到的Ka波段毫米波云雷达数据。Ka波段毫米波云雷达探测高度为30~15 km, 探测时间分辨率为5 s, 垂直分辨率为30 m。雷达体质采用全固态、全相参多普勒、脉冲压缩, 能够在长时间的观测中稳定获得探测资料。

本文所使用的雨滴谱资料是2019年7月12日—8月31日在青海玉树市气象局的HSC-OTT Parsivel 2激光降水粒子谱仪连续观测得到。HSC-OTT Parsivel 2激光降水粒子谱仪是一种由北京华创风云集团联合德国OTT北京公司生产的以激光测量为基础的光学传感器。其测量原理是: 当有降水粒子通过一维光束带下落时, 光信号转换为电子信号, 通过测量遮挡物的宽度和经过的时间计算降水粒子的尺度和速度, 并对地面雨滴谱信息自动分类。雨滴谱仪将降水粒子按照等效体积直径和落速大小划分为32个等级, 有效测量范围分别为0.2~25 mm和0.2~20 m/s。由于直径大于6 mm的雨滴已经在下落过程中破碎, 因此剔除雨滴谱仪观测记录中直径大于6 mm的样本。

雨滴谱仪实测数据的物理意义是指平均直径 D_i ($1 \leq i \leq 32$) 和下落末速度 V_j ($1 \leq j \leq 32$) 对应的降水粒子个数 A_{ij} , 该雨滴谱仪取样面积 54 cm^2 , 采样间隔为1 min。那么与直径通道 D_i 对应单位空间体积的降水粒子总数 $N(D_i)$ 可以表示为:

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{32} \frac{A_{ij}}{V_j \times T \times S}, \quad (2)$$

式中: $N(D_i)$ 是每单位体积每单位尺寸间隔的雨滴数量浓度。 T 和 S 分别表示雨滴谱的采样周期和采样面积, $S=54 \text{ cm}^2$, 雨滴谱仪观测数据的时间分辨率 T 为60 s。

由此可以进一步计算得到粒子数总密度 N_0 、雷达反射率因子 Z (mm^6/m^3) 和降雨强度 R (mm/h), 计算公式如下:

$$N_0 = \sum_{D_i=0}^{D_{\max}} N(D_i), \quad (3)$$

雷达反射率因子 Z :

$$Z = \sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^6 \Delta D_i, \quad (4)$$

降雨强度 R :

$$R = \frac{6\pi}{10^4} \sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} N(D_i) D_i^3 V_j \Delta D_i, \quad (5)$$

式中: $V(D_i)$ (m/s) 表示直径 D_i 的雨滴谱对应下落末速度。

分析雨滴谱的粒径变化时, 中值体积直径 D_0 是指从小滴起累加降水量达到总降水量一半处的雨滴直径, 它代表了半数雨滴的直径水平, 因此用 D_0 说明降水过程中雨滴大小的变化。

$$\sum_{D_i=0}^{D_{\max}} N(D_i) D_i^3 = 2 \sum_{D_i=0}^{D_0} N(D_i) D_i^3, \quad (6)$$

雨滴谱的参数化是运用数学模型来描述自然界降水粒子浓度随尺度的变化。有关雨滴谱分布的模型很多, 如M-P分布、Gamma分布。其中, Gamma分布模型的表达式为公式(1)。

2 降水类型分类

有关降水云的划分有许多种办法, 傅云飞等^[20]根据雷达回波特征和雨滴谱雨强进行降水分类, 将云降水分为层状云降水、混合云降水和积雨云降水三种类型; 本文参照柳臣中等^[21]的方法, 按照天气学云的定义, 采用雨滴谱雷达回波和Ka波段毫米云雷达图像将雨滴谱仪记录到降水数据的云进行分类。人工筛选统计了共计6136份雨滴谱资料, 把连续降水时间大于15 min定为一次有效降水, 将筛选出的雨滴谱资料划分为70次降水。由于雷达回波强度 $<10 \text{ dBz}$ 的资料对降水的贡献微乎其微, 因此将雷达回波强度 $<10 \text{ dBz}$ 的数据资料视为非降水回波^[15]。明显降水的回波因子在 $30 \sim 50 \text{ dBz}$ ^[22], 本文中雷达反射率因子 $Z > 35 \text{ dBz}$ 为积雨云降水, $Z < 30 \text{ dBz}$ 为层状云降水, 处于 $30 \sim 35 \text{ dBz}$ 为混合云降水。

降水类型统计如表1和表2所示。从表1可以看出, 按照频次来看玉树地区主要降水类型为层状云。层状云降水占到总降水次数的57.14%, 积雨云降水次之, 混合云降水次数最少。7月中下旬(20 d)层状云降水和积雨云降水的次数与8月(31 d)相比差距不大。主要是在混合云降水上有浮动, 7月中下旬(20 d)混合云降水频次要低于8月(31 d)。从表2来看, 积雨云降水的样本数最多占比40.67%, 层状云次之37.00%, 混合云降水样本数最少22.31%。与潘晓等^[17]统计的夏季高原降水主要以深厚对流降水为主(67.8%), 浅薄降水次之(26.4%), 深厚强对流降水出现最少(5.8%)有出入。统计出的积雨云降水的样本数略高于层状云的样本数, 原因是层状云降水的次数虽然多, 但单次有效降水的持续时间并没有积雨

云降水时间长。

表1 玉树地区三类降水的次数统计

Table 1 The statistics of frequency for three types of rainfall in Yushu region

时间	层状云降水		混合云降水		积雨云降水	
	次数	比例/%	次数	比例/%	次数	比例/%
7月中下旬	21	61.76	4	11.76	9	26.47
8月	19	52.78	8	22.22	9	25.00
平均持续时间/min	77		157		190	

表2 玉树地区三类降水样本统计

Table 2 The statistics of precipitation samples for three types of rainfall in Yushu region

降水类型	样本个数	比例/%
层状云降水	3119	37.00
混合云降水	1881	22.31
积雨云降水	3428	40.67

3 结果分析

3.1 三类降水微物理特征参量

青海玉树地区7月中下旬—8月的观测期间内雨滴谱测量总降水量为125 mm。通过对70次样本降水的雨滴谱进行平均，得到每个降水过程的1 min的平均数据（图1）。青藏高原东部玉树地区雨滴谱仪测量的单次降雨量平均值为1.80 mm，其中7月中下旬单次降雨平均降雨量1.78 mm，8月单次降雨平均降雨量为1.82 mm，单次最大降雨量为11.81 mm。与常祎等^[18]的研究结果略有差别（2014年那曲地区7月日平均降水量3.22 mm，8月为5.24 mm）。单次雨强极大值的平均值为3.5 mm/h，其中7月中下旬雨强平均值为3.32 mm/h，8月雨强平均值为3.72 mm/h。表明玉树地区降雨量小，持续时间短，降雨频次多。

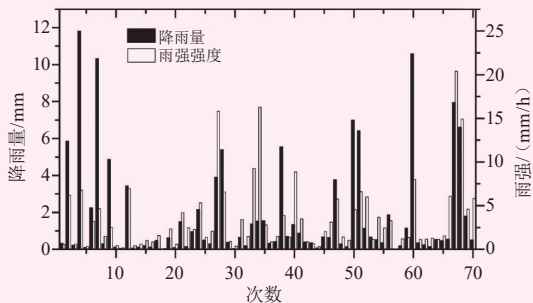


图1 玉树地区70次雨强极大值和累计降雨量

Fig. 1 70 times rainfall intensity and accumulated rainfall in Yushu region

特征直径包括 D_m 平均粒径、 D_v 平均体积直径、 D_d 众数直径、 D_p 优势直径、 D_{nd} 中数直径、 D_n 中数体积直径^[23]。对表3中特征直径进行综合分析，平均粒径 D_m 中积雨云降水的粒径是最大的，层状云降水的粒径是最小的，混合云降水的数值介于两种降雨特征之间；

三类云降水的众数直径 D_d 数值相同，表明玉树地区降水中最大频率直径在0.562 mm左右是最多的；平均体积直径 D_v 和众数体积直径 D_n 有着良好的正相关关系，也有助于区分三类云降水；对含水量贡献最多的直径 D_p 混合云降水和积雨云降水的值相同为1.375 mm，而层状云明显低于前者。

表3 三类云降水微物理特征参数

Table 3 Microphysical parameters for three types of rainfall

类型	特征参数/mm					
	D_m	D_v	D_d	D_p	D_{nd}	D_n
层状云	0.738	1.096	0.562	0.812	0.687	0.937
混合云	0.804	1.225	0.562	1.375	0.812	1.062
积雨云	0.830	1.354	0.562	1.375	0.812	1.375

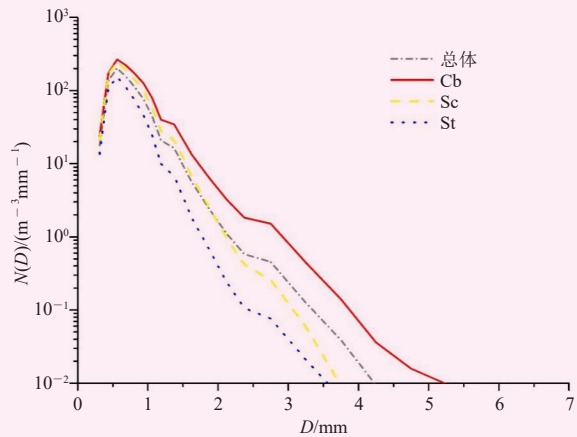


图2 玉树地区三类云降水雨滴谱浓度分布

(灰色点划线为总体、红色实线为积雨云降水、黄色划点线为混合云降水、蓝色点线为层状云降水)

Fig. 2 Raindrop size distributions for three types of rainfall in Yushu region

(the gray dotted line is overall, the red solid line is cumulonimbus precipitation, the yellow dotted line is stratocumulus rainfall, the blue dotted line is stratiform rainfall)

为了获得观测期间玉树地区的雨滴谱分布特征，在处理数据的时候对统计出的70次降水进行标准化处理：对单次降水的雨滴谱进行平均，得到每个降水过程的1 min的平均数据。归类到三类云降水中，得到的不同降雨类型的平均谱图数据。图2三条线各代表三类云降水，积雨云降水Cb在图像的最上层，层状云降水St在最下层，混合云降水Sc处于二者之间。表明相同粒径下，雨滴谱浓度大小为 $Cb > Sc > St$ ，并且浓度越大谱宽越宽。三类云降水的谱图都呈现单峰形，峰值位于0.562 mm左右。随着雨滴粒径的增大，滴谱浓度数随之减弱，变化趋势大致相同。在2.5 mm附近浓度随着粒径增大而减小的趋势变小，这可能是下落

时小雨滴之间的碰撞合并或者大雨滴破碎有关。积雨云、混合云和层状云三类云降水最大雨滴粒径分别为5.2 mm、3.7 mm和3.5 mm。

3.2 Gamma 分布的拟合特性

运用阶矩法估算雨滴谱参数参照熊飞麟等^[12]的算法，对于Gamma分布的雨滴谱来说定义第n阶距为：

积分后得到：

$$M_n = N_0 \lambda^{-(\mu+n+1)} \Gamma(\mu+n+1). \quad (7)$$

在Gamma分布中，每个矩量由 N_0 、 λ 、 μ 这三个分布参数决定，求Gamma分布三个参数就需要这三个矩量，通常把阶数0、1称为低阶，2、3、4称为中阶，5、6称为高阶。本文采用0、3和6阶距来对Gamma分布模型中的3个参数进行估算（表4）。

表4 三类降水Gamma分布拟合参数
Table 4 Average values of standardized Gamma distribution parameters for three types of rainfall

参数	积雨云	混合云	层状云
$\lg N_0 / (\text{m}^3/\text{mm})$	3.68	3.95	4.20
μ	0.347	0.667	1.16
$\lambda / (\text{mm}^{-1})$	3.280	4.360	5.830

通过Gamma拟合所得到的参数可以看出，积雨

云浓度参数 N_0 的值最小， $\lg N_0$ 的值为3.68 m^3/mm ，形状因子 μ 为0.347、斜率因子 λ 为3.280 mm^{-1} ；层状云浓度参数最大， $\lg N_0$ 的值为4.20 m^3/mm ，形状因子 μ 为1.16、斜率因子 λ 为5.830 mm^{-1} ；混合云处于两者之间， $\lg N_0$ 的值为3.957 m^3/mm ，形状因子 μ 为0.667、斜率因子 λ 为4.360 mm^{-1} 。与张洪胜等^[14]南京地区 $\lg N_0$ 的值为7.2 m^3/mm ，形状因子 μ 为11.6、斜率因子 λ 为9.2 mm^{-1} 相对比，3个参数都偏小，表明雨滴谱分布地域性差异较大。与李山山^[24]高原东坡泸定站 $\lg N_0$ 为3.70 m^3/mm ，石渠站 $\lg N_0$ 为3.16 m^3/mm 相比，玉树地区整体的数值略大于高原东坡地区。三类降水的Gamma分布拟合与M-P分布拟合如图3所示。两种拟合之间的差距不大，积雨云Cb的谱宽最宽，最大粒径为4 mm；混合云Sc其次，最大粒径为3.3 mm；层状云St谱宽最窄，最大粒径为2.5 mm。对比拟合曲线与实测数据的差异性可以更加客观地对比模拟的适应度。通过数据对比，记录0.312 mm以下的的数据，3类云降雨的差异均超过200%。模拟较好的粒径区间为0.562~5.5 mm，积雨云降水的差异为28.47%、混合云云的差异为11.18%、层状云的差异为9.9%。因此，玉树地区雨滴谱在适当范围内是能够运用Gamma模拟的。

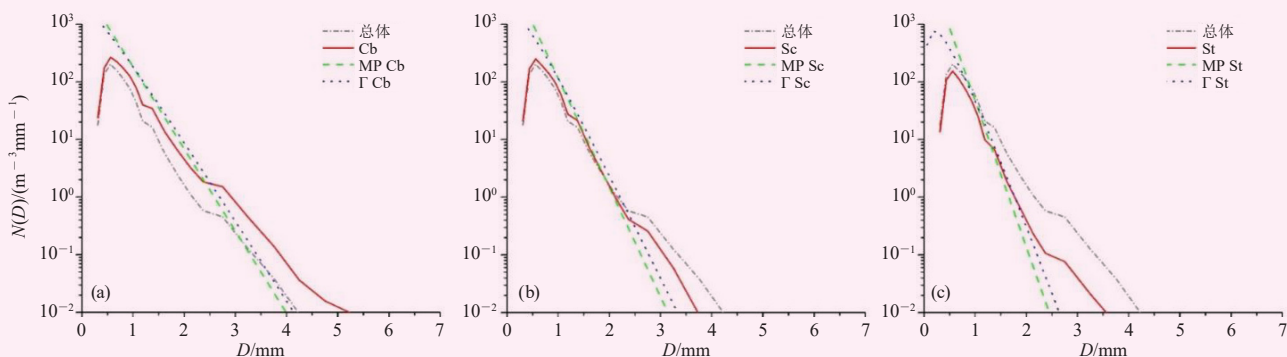


图3 三类云降水的平均雨滴谱分布与M-P、Gamma拟合曲线
(灰色点划线代表总体、红色实线为实测雨滴谱分布、绿色点划线为M-P拟合分布、黑色点线为Gamma拟合分布)
(a) 积雨云降水Cb; (b) 混合云降水Sc; (c) 层状云降水St

Fig. 3 Raindrop size distributions and M-P, Gamma-distribution fitting curves for three types of rainfall
(the gray dotted line represents the whole, the red solid line represents the measured raindrop size distribution, the green dotted line represents the M-P distribution, and the black dotted line represents the Gamma distribution)
(a) cumulonimbus rainfall, (b) stratocumulus rainfall, (c) stratiform rainfall

3.3 拟合参数斜率因子λ与形状因子μ之间的关系

μ - λ 的经验关系已经被广泛证明能够更好的描述降雨云中的雨滴谱变化，表5所示大量研究表明^[25-28]在不同降水类型、不同气候条件、不同地理环境之间 μ - λ 的经验关系各不相同。图4中红色实线积雨云关系线，黄色点划线为混合云关系线，蓝色点线为层状云关系线。从划分出来的三类云降水数据通过二次多项式进行拟合得到 μ - λ 的经验关系：

积雨云Cb的关系式为： $\lambda = 0.9344\mu^2 + 1.597\mu + 2.574$ ；

混合云的关系式为： $\lambda = 0.0379\mu^2 + 2.344\mu + 2.587$ ；

层状云St的关系式为： $\lambda = 0.725\mu^2 - 0.222\mu + 4.73$ 。

可以看出：任意降水云的模拟都具有较好的二项式关系，随着形状因子 μ 的增大， λ 也相应增加；当 μ 小于1时，层状云的斜率因子 λ 最大，积雨云最小，混合云处于两者之间。而当 μ 大于1时，情况出现翻转，积雨云的斜率因子 λ 最大，层状云其次，混合云最

小。原因是层状云雨滴谱浓度分布主要贡献在偏小的小粒子上，谱宽最窄，使得其斜率的变化值最小。而混合云与积雨云的雨滴谱浓度分布主要贡献在除了较小的小粒子外，还有较大粒子的贡献，谱宽较宽，斜率变化率较大。

表5 各地区 μ - λ 的经验关系

Table 5 The μ - λ relations of other parts of the world

经验关系	地区	系数a	系数b	系数c
Baojun Chen ^[1]	南京地区	0.0149	0.491	2.015
Balaji ^[25]	台湾北部	0.0235	0.472	2.394
Zuhang Wu ^[26]	西太平洋	0.0278	0.601	1.381
Long Wen ^[27]	南京江宁	$\mu = -0.021\lambda^2 + 0.988\lambda - 2.669$		
积雨云	玉树地区	0.9344	1.597	2.574
混合云	玉树地区	0.0379	2.344	2.587
层状云	玉树地区	0.725	-0.222	4.73

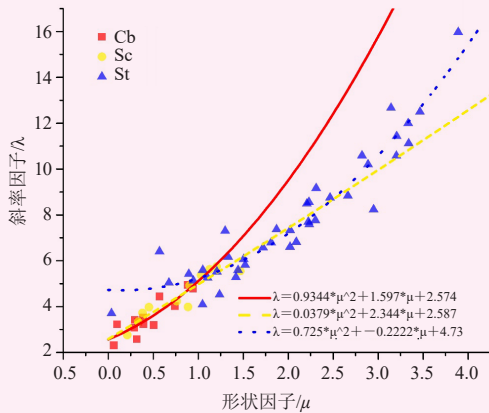


图4 实测 μ - λ 散点图以及三类降水拟合曲线 (红色实线积雨云关系线, 黄色点划线为混合云关系线, 蓝色点划线为层状云关系线)

Fig. 4 Scatter plots μ - λ relations and fitting curves for three types of rainfall (red solid line: cumulonimbus relationship line, yellow dotted line: stratocumulus cloud relationship line, blue dotted line: stratiform cloud relationship line)

3.4 降雨强度与雷达反射率因子之间的关系

雷达定量估计降水是通过雷达反射率因子 Z 和降雨强度 R 的关系来完成的，而雷达反射率因子是由降水粒子谱分布决定的，不同的粒子谱分布会得到不同的雷达反射率因子。雷达反射率因子 Z 和降雨强度 R 的计算表达式如下所示

$$Z = B \cdot R^b$$

带入公式(4)和(5)根据对前面降水的分类，对三类降水的 Z - R 关系进行计算，拟合了三类降水的 Z - R 分布情况。计算出的 R 值为 $0 \sim 2.8$ ，表明高原降水的雨强远远低于同类型的东西部地区。随着雨强的增大，反射率因子也逐渐变大，二者有良好的线性关系。图5所示，红色实线积雨云关系线，黄色点

划线为混合云关系线，蓝色点线为层状云关系线，灰色点划线为天气雷达关系线。散点图中层状云降水主要出现在 $0 \sim 0.75$ mm/h内，相应的雷达回波因子是最小的；混合云集中在 $0 \sim 1.75$ mm/h内；积雨云在 $0 \sim 2.8$ mm/h内都有分布。在不同类型降水中， B 值不断减小， b 值也对应减小，积雨云降水 B 数值为混合云与层状云的2倍。与天气雷达相比，玉树地区三类云降水过程的 Z - R 关系参数 B 值大于天气雷达 ($B=300$, $b=1.4$)。原因在于玉树地区的降雨强度低于一般地区，导致拟合 B 值较大，还有雷达自身的波长、脉宽、波束宽度不同，这些因素都会影响到 Z - R 关系。表6中列举了我国南部(广东)和东部地区(南京)的 Z - R 分布，与青藏高原东部地区相比较，除广东地区层状云降水的 B 值为899.45远大于各类参数值外，其

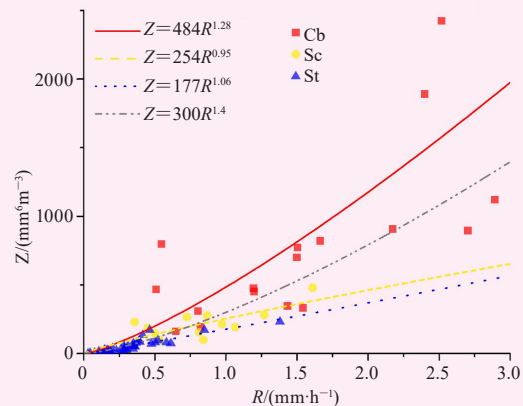


图5 三类降水的雷达反射率因子 Z 与雨强 R 关系散点图及拟合结果

(红色实线积雨云关系线, 黄色点划线为混合云关系线, 蓝色点线为层状云关系线, 灰色点划线为天气雷达关系线) Fig. 5 Scatter plot of radar reflectivity factor Z versus rain rate R and the fitted relationship for three types of rainfall (red solid line: cumulonimbus relationship line, yellow dotted line: stratocumulus cloud relationship line, blue dotted line: stratiform cloud relationship line, gray dotted line: weather radar relationship line)

表6 玉树地区以及其他地区降水的 Z - R 关系

Table 6 The statistics of Z - R relationship in precipitation in Yushu region and others

Z-R关系		公式
天气雷达Z-R关系		$Z = 300R^{1.4}$
三类Z-R关系	积雨云Cb	$Z = 484R^{1.28}$
	混合云Sc	$Z = 254R^{0.95}$
	层状云St	$Z = 177R^{1.06}$
广东地区三类Z-R关系 ^[20]	对流降水阶段	$Z = 212.90R^{1.27}$
	层化降水阶段	$Z = 351.97R^{1.31}$
	层状云降水阶段	$Z = 899.45R^{1.28}$
南京地区三类Z-R关系 ^[28]	积雨云	$Z = 200.13R^{1.48}$
	混合云	$Z = 218.32R^{1.49}$
	层状云	$Z = 290.35R^{1.53}$

他降水都在标准天气雷达 B 值为300左右。对于 b 值来说,高原东部与我国东部相差不大,都小于天气雷达1.4;我国南部地区的 B 值大于天气雷达1.4。从降雨类型来看,我国南部和东部地区的 B 值从积雨云、混合云到层状云是逐渐递增的;高原东部地区的 B 值从积雨云、混合云到层状云是逐渐递减的,出现这类现象的原因可能是不同地理环境以及不同气候条件。

3.5 降水云的微物理结构

利用玉树地区Ka波段雷达资料,通过分类后的三类降水资料中选取典型的三次降水过程分析降水云的微物理结构。分别是8月23日积雨云、8月19日混合云、8月12日层状云。7月中下旬—8月玉树地区整个Ka波段毫米云雷达数据测得最大雷达回波为27 dBz。

积雨云8月23日23时开始,云雷达上空出现了积雨云,此时回波反射因子不超过10 dBz,反射率因子 <20 dBz,径向速度 <3 m/s,速度谱宽在0.6 m/s左右,在23:20左右地面开始观测到有雨滴降落,云底部距离地面1 km或已经接地。23:30左右,云顶高度上升到接近11 km左右,出现了强回波区,强回波域在离地2~3 km,图6a中显示为红色与暗红色位置,回波强度达到23 dBz,径向速度大于9 m/s,表明有较大粒子出现。谱宽值出现大于1.8 m/s的区域,说明伴随雨滴下落的还有冰相粒子存在。结合图7a,

雨滴谱分布为单峰形粒子数浓度在 $124\text{ m}^{-3}/\text{mm}$,粒子直径从0.4~2 mm不等,降雨强度为1.63 mm/h,最大粒径位于2.37 mm位置。随后云中回波强度减弱但速度谱宽大于1.2 m/s的区域不断增加,粒子数浓度积雨不断增加。到23:45左右,反射率因子再次出现大值区,径向速度-6 m/s区域升高到4 km位置,地面降水增大,图7b所示粒子数浓度在 $252\text{ m}^{-3}/\text{mm}$,降雨强度达到2.88 mm/h,地面累计降水为0.68 mm。在00:00和00:30中又有云团发生发展,但雷达回波逐渐减弱,云层逐渐消散出现了亮带,位于2.2 km高度上,积雨云降水过程基本结束。此处过程累计降水为8.86 mm,平均雨强为3.7 mm/h,结合图7的演变我们可以看出,积雨云降水随着降水强度的增加,雨滴谱浓度增大缓慢,主体逐渐向着大雨滴方向移动,大粒径不断出现,并且小粒径的数浓度不断增加。

8月19日19:00,雷达上空存在两层云,高层云回波较弱,均小于0 dBz,在底层对流云消亡后随之消失。底层为发展中的对流云回波此时回波反射因子在15 dBz左右,径向速度小于0 m/s,速度谱宽小于0.6 m/s。在19:40左右云顶高度在7 km左右,离地面2 km左右出现强回波区域,回波强度达到23.5 dBz,径向速度大于9 m/s,谱宽值出现大于1.5 m/s的区域。地面也开始观测到有雨滴降落,图8a中粒子数浓度

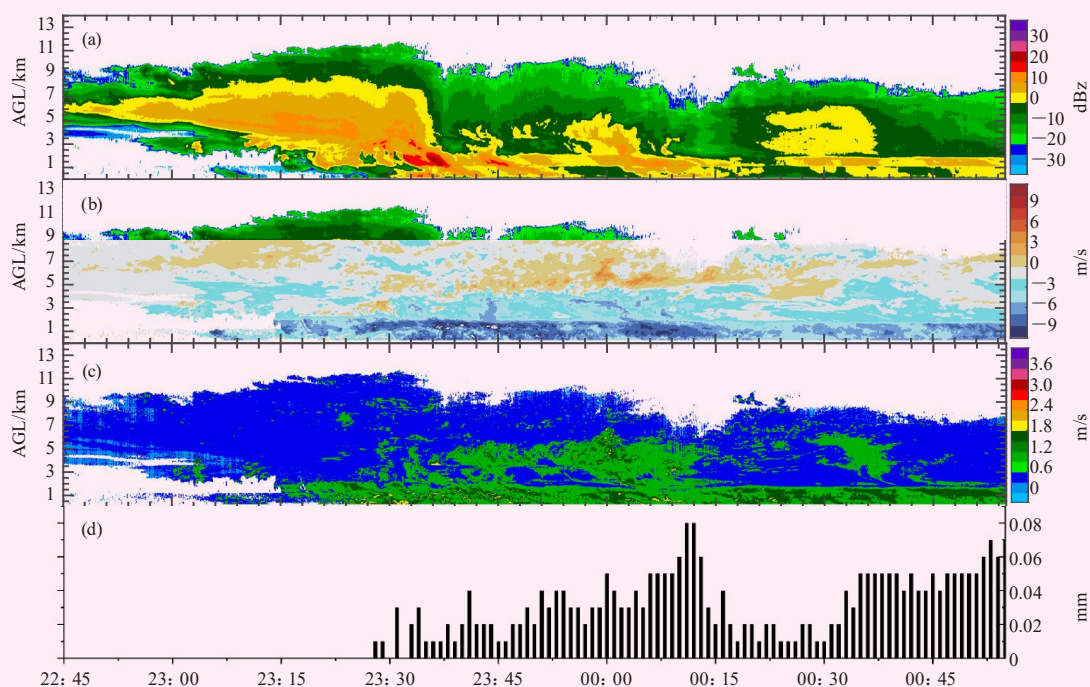


图6 Ka波段毫米云雷达观测到的2019年8月23日22:45—次日00:45(北京时,下同)玉树地区的积雨云降水

(a) 反射率因子; (b) 径向速度; (c) 速度谱宽; (d) 降雨量

Fig. 6 Time-height distributions of reflectivity (a), radial velocity (b), velocity spectral width (c), rainfall (d) by the Ka-band millimeter cloud radar during 22:45 BT 23 to next day 00:45 BT August 2019 in Yushu region

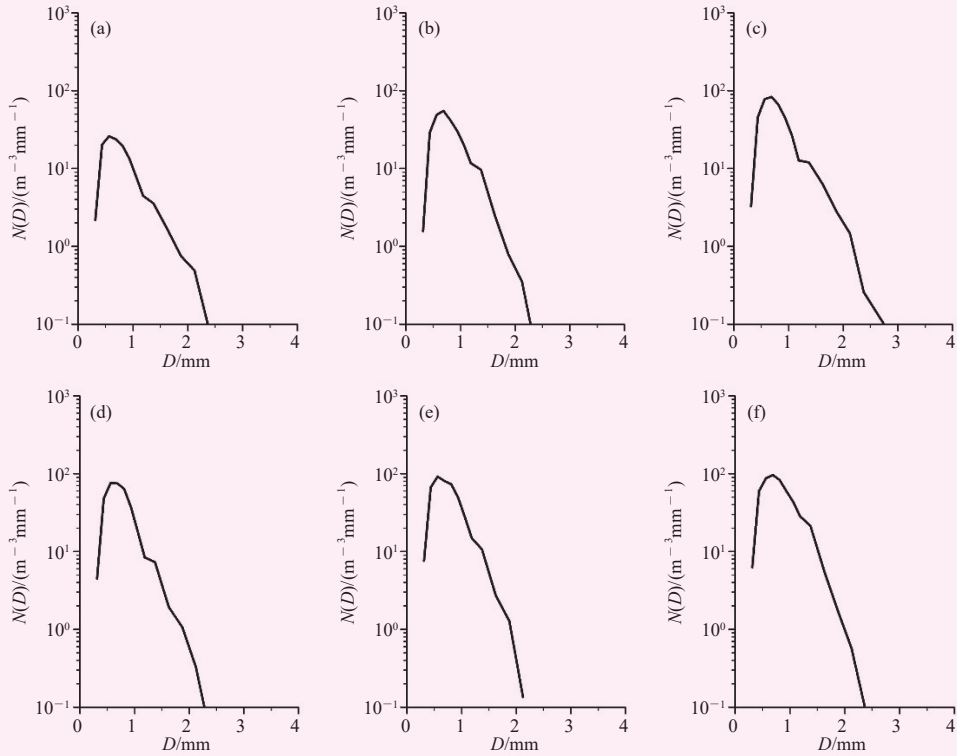


图7 2019年8月23—24日15 min内积雨云雨滴谱分布演变规律
(a) 23: 45; (b) 00: 00; (c) 00: 15; (d) 00: 30; (e) 00: 45; (f) 01: 00
Fig. 7 Raindrop size distributions of cumulonimbus rainfall in 15 min
(a) 23:45, (b) 00:00, (c) 00:15, (d) 00:30, (e) 00:45, (f) 01:00

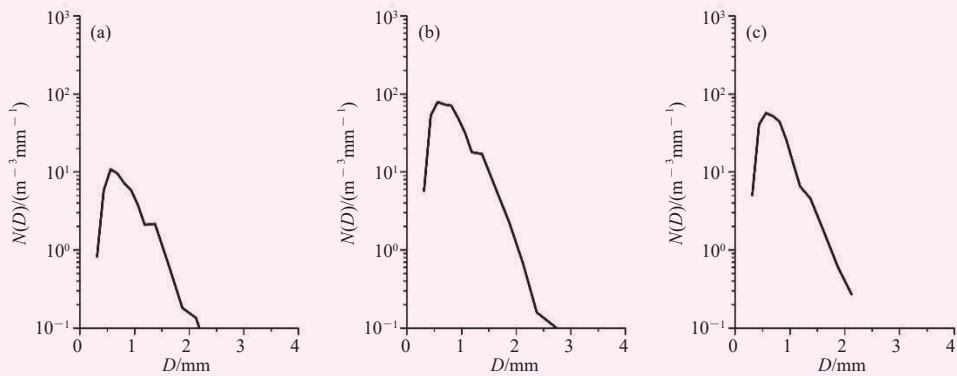


图8 2019年8月19日15 min内混合云雨滴谱分布演变规律
(a) 19: 30; (b) 19: 45; (c) 20: 00
Fig. 8 Raindrop size distributions of stratocumulus rainfall in 15min
(a) 19:30, (b) 19:45, (c) 20:00

为 $49.06 \text{ m}^{-3}/\text{mm}$ ，粒子直径在 $0.4 \sim 2 \text{ mm}$ ，最大粒径为 2.12 mm ，此时降雨强度为 0.32 mm/h 。在19: 45后发展最为旺盛，最大雨强为 5.99 mm/h 粒子数达到峰值，最大粒径为 2.75 mm ，随后雷达回波逐渐减弱降水过程结束。此次过程累计降水为 0.94 mm ，平均雨强为 1.37 mm/h ，结合图8混合云降水雨滴谱分布形态变化明显，三个时次的雨滴谱浓度分别为 $49.06 \text{ m}^{-3}/\text{mm}$ ， $406.85 \text{ m}^{-3}/\text{mm}$ ， $250.67 \text{ m}^{-3}/\text{mm}$ ，粒子

增长速度较快。

8月12日23: 00时，雷达上空出现了较弱的对流云，雷达回波最大不超过 15 dBz ，径向速度数值偏小，零星值达到 6 m/s ；谱宽值在 0.6 m/s 左右，云顶高度为 $6 \sim 7 \text{ km}$ 。并且有明显的零度层亮带位于离地面高度 2 km 左右的位置，雷达反射率在其上部随高度递减，在其下部随着高度的降低。说明含有冰相粒子在下落过程中，上层的冰相粒子下落至在零度层后有

融化过程,冰相粒子融化为水滴,水滴碰并增长变成大水滴,导致雷达反射率变强。到了零度层以下,由于雨滴的下落速度较快,降水粒子的浓度反而变小,雷达反射率强度反而变低。雨滴谱浓度分布为单峰形整体变化不大,平均雨强为2.6 mm/h,累计降水为4.28 mm,平均数浓度为409.56 m⁻³/mm。

综上所述,玉树地区不同云降水所对应的雷达回波和雨滴谱分布演变规律有着明显的差别。积雨云回波强度比较强,最大值过20 dBz。云顶发展高度较高,并且零度层亮带难以观测到;强回波区域在离地2~3 km左右。混合降水的发生发展高度位于积雨云回波强度类似,但最大值在20 dBz左右;云顶发展高度较高,接近13 km左右,没有零度层亮带出现,强回波区域在离地2~3 km左右;持续时间较短,垂直尺度大于水平尺度。层状云降水中,回波强度比较弱,最大值低于15 dBz。云顶发展高度在6~7 km左右较为平整;能够直接看见零度层亮带,位于2 km左右,强回波区域与零度层亮带同高度。积雨云中雨滴谱浓度增大缓慢,主体逐渐向着大雨滴方向移动,大粒径不断出现,并且小粒径的数浓度不断增加,持续时间较长。混合云中雨滴谱浓度增大和减弱的时间较短,持续时间弱于积雨云。此次层状云降水时间较长,各项雨滴谱参数都较为稳定整体变化较小。三类云降水的谱图都呈现单峰形,峰值位于0.562 mm粒径左右。随着雨滴粒径的增大,滴谱浓度数随之减弱,变化趋势大致相同。连续降水使得不断增加的小雨滴之间的碰撞合并并在1.375 mm粒径位置第一次出现了浓度随着粒径的增大而减小的趋势变小的情况;第二次出现这种情况是在2.5 mm粒径左右的附近,原因为随着降水过程持续时间变长或降雨强度增加,较大雨滴破碎成大雨滴使得浓度变小的趋势变小。与霍朝阳^[13]年分析广东层状云降水雨滴谱浓度图相比,广东地区层状云谱图只出现了第二次减缓趋势。与于建宇^[15]年分析青藏高原那曲地区积雨云降水,谱图变化趋势相同,但那曲地区积雨云第二次减缓趋势更加明显。与Wang等^[29]研究高原东坡稻城地区雨滴谱相比,玉树地区的谱宽更窄。

4 结论与讨论

本文利用青藏高原玉树气象局的HSC-OTT Parsivel 2激光降水粒子谱仪在2019年7月中下旬至8月观测得到的70次降水过程的雨滴谱资料和Ka波段云雷达观测资料,研究青藏高原东部玉树地区降雨的雨滴谱特征,主要结论如下:

(1) 高原地区7月中下旬至8月总降水量为

125 mm,两个月降雨强度相当,玉树地区主要降水类型为层状云,降水占到总降水次数的57.14%;积雨云降水次之,混合云降水次数最少。三类云降水最大雨滴粒径分别为5.2 mm、3.7 mm和3.5 mm,平均粒径为0.801 mm。三类云降水的谱图都呈现单峰形,峰值位于0.562 mm左右。相同粒径下,雨滴谱浓度大小为Cb>Sc>St,并且浓度越大谱宽越宽。

(2) 三类云在玉树地区的Gamma分布拟合模拟较好的粒径为0.562~5.5 mm,但各个粒径区间内的拟合值都有高估的情况,特别是对小雨滴浓度值高估明显;任意降水云的模拟都具有较好的二项式关系,随着形状因子 μ 的增大, λ 也相应增加。层状云雨滴谱浓度分布主要贡献在小粒径上且谱宽最窄,使得其斜率的变化值最小。而混合云与积雨云的雨滴谱浓度分布主要贡献分布均匀且谱宽较宽所以,变化率较大;积雨云、混合云和层状云的Z-R关系拟合,随着雨强的增大,反射率因子也逐渐变大,二者有良好的线性关系,拟合的B值从积雨云、混合云到层状云是逐渐递减的。

(3) 选取个例中三类降水云的结构相同点为零度层位于2 km左右,降雨时云底高度很低或接地。积雨云和混合云发生发展旺盛,最高云高可达13 km,但混合云持续时间短;层状云发展较为平稳,云高在6~7 km。连续降水使得不断增加的小雨滴之间的碰撞合并并在1.375 mm粒径位置第一次出现了浓度随着粒径增大而减小的趋势变小的情况;第二次出现这种情况是在2.5 mm粒径左右的附近,原因为随着降水过程持续时间变长或降雨强度增加,较大雨滴破碎成大雨滴使得浓度变小的趋势变小。

本次雨滴谱分布受到地理环境的局限性,仅适用于玉树地区。按照降雨次数来划分使得数据更具有代表性,层状云的估值较为准确,但在统计中数据对于积雨云的低估使得积雨云降水整体数据偏小,将在今后的研究中进一步深入研究。

参考文献

- [1] Chen B, Yang J, et al. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in Eastern China. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2013, 91(2): 215-227.
- [2] Wu Y, Liu L. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Tibetan Plateau and Southern China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(6): 727-736.
- [3] 马若赞. 2014年夏季青藏高原中部雷达观测降水回波的分类及日变化特征研究. 北京: 中国气象科学研究院, 2018.
- [4] 宋灿, 周毓荃, 吴志会. 雨滴谱垂直演变特征的微雨雷达观测研究. *应用气象学报*, 2019, 30(4): 479-490.
- [5] 官福久, 何友江, 王吉宏, 等. 东北冷涡天气系统的雨滴谱特征. *气象科学*, 2007, (4): 365-373.

(下转134页)

- 界雨量及预警区划分析. 甘肃科学学报, 2019, 31(6): 62-67.
- [8] 狄靖月, 许凤雯, 李宇梅, 等. 东南地区引发滑坡灾害降水分型及阈值分析. 灾害学, 2019, 34(1): 62-67, 93.
- [9] 李忠燕, 田其博, 张东海, 等. 遵义市不同滑坡灾害易发区滑坡临界雨量研究. 水土保持通报, 2018, 38(6): 217-223, 239.
- [10] 付世军, 文敏. 南充市强降雨诱发滑坡灾害风险预警技术研究. 现代农业科技, 2018, (6): 189-192.
- [11] 覃江涛. 大新县城区内涝点临界雨量预警阈值研究. 广西水利水电, 2020, (1): 116-118.
- [12] 刘晓燕, 李晓宇, 高云飞, 等. 黄土丘陵沟壑区典型流域产沙的降水阈值变化. 水利学报, 2019, 50(10): 1177-1188.
- [13] 杨宗佳, 王礼勇, 石莉莉, 等. 降雨滑坡多指标监测预警方法研究. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 272-285.
- [14] 官清华, 黄光庆, 张俊香. 广东省小流域地区降水诱发的滑坡灾害预警体系探讨. 气象科技进展, 2015, 5(4): 53-56.
- [15] Glade T, Crozier M J, Smith P. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "antecedent daily rainfall model". Pure and Applied Geophysics, 2000, 157 (6/8): 1059-1079.
- [16] 钟荫乾. 滑坡与降水关系及其预报. 中国滑坡灾害与防治学报, 1998, 9(4): 81-86.
- [17] 林孝松, 郭跃. 滑坡与降水的耦合关系研究. 灾害学, 2001, 16(2): 87-92.
- [18] 李德心, 何思明, 朱兴华, 等. 前期有效降水对滑坡启动影响分析. 灾害学, 2011, 26(3): 41-45.
- [19] 马超, 胡凯衡, 赵晋恒, 等. 震后泥石流的激发雨量特征——以汶川地震和集集地震后泥石流为例. 灾害学, 2013, 28(4): 89-94.
- [20] 铁永波, 周洪福, 倪俊勇. 西南山区短时强降雨诱发低频泥石流成因机制分析——以四川省宝兴县冷木沟泥石流为例. 灾害学, 2013, 28(4): 110-113.
- [21] 盛逸凡, 李远耀, 徐勇, 等. 基于有效降水强度和逻辑回归的降水型滑坡预测模型. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 156-162, 172.
- [22] 林巍, 李远耀, 徐勇, 等. 武陵山区湘西北滑坡灾害临界降水量阈值研究. 长江科学院院报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20190214.1447.004.html>.
- [23] 叶殿秀, 陈鲜艳, 张强, 等. 1971—2003年三峡库区诱发滑坡的临界降水阈值初探. 长江流域资源与环境, 2014, 23(9): 1289-1294.
- [24] 李宇梅, 狄靖月, 许凤雯, 等. 基于当日临界雨量的国家级滑坡灾害风险预警方法. 气象科技进展, 2018, 8(3): 77-83.
- [25] 沈玲玲, 刘连友, 杨文涛, 等. 基于TRMM降水数据的四川省滑坡灾害降水阈值分析. 灾害学, 2015, 30(2): 220-227.
- [26] 李铁锋, 丛威青. 基于Logistic回归及前期有效雨量的降水诱发型滑坡预测方法. 中国滑坡灾害与防治学报, 2006, 17(1): 33-35.
- [27] 唐红梅, 魏来, 高阳华, 等. 基于逻辑回归的重庆地区降水型滑坡预报模型. 中国滑坡灾害与防治学报, 2013, 24(3): 32-37.
- [28] 唐春燕, 杨芳. 南溪区山洪滑坡灾害特征分析与预警指标探究. 南方农业, 2018, 12(21): 156-158.
- [29] 张锡涛, 刘翔宇, 谢谟文, 等. 基于岩质滑坡引发泥石流的影响范围评价模型. 工程地质学报, 2013, 21(4): 598-606.
- [30] 常鸣, 唐川, 苏永超, 等. 雅鲁藏布江米林段泥石流堆积扇危险范围预测模型. 工程地质学报, 2012, 20(6): 971-978.
- [31] 余峙丹, 张辉, 郭荣芬. 云南楚雄特大滑坡泥石流气象成因. 气象科技, 2010, 38(1): 136-140.
- [32] 章国材. 自然灾害风险评估与区划原理和方法. 北京: 气象出版社, 2014: 56-60.
- [33] 费晓燕, 柳锦宝, 屈伯强, 等. 四川省降水诱发滑坡灾害的气象预警模型. 水土保持通报, 2017, 37(5): 315-321, 327.
- [34] 郑志海. 月动力延伸预报研究进展回顾. 气象科技进展, 2013, 3(1): 25-30.
- [35] 马浩, 郑志海, 李正泉, 等. 15-30 d延伸期逐日预报在线显示平台的设计与实现. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(4): 78-85.
- [36] 周辰光, 杜良敏, 高伟, 等. CFSv2在湖北省梅雨特征量延伸期预报中的应用. 暴雨灾害, 2020, 39(2): 185-191.

(上接121页)

- [6] 陈宝君, 李子华, 刘吉成, 等. 三类降水云雨滴谱分布模式. 气象学报, 1998, (4): 123-129.
- [7] 王可法, 张卉慧, 张伟, 等. Parsivel激光雨滴谱仪观测降水中异常数据的判别及处理. 气象科学, 2011, 31(6): 732-736.
- [8] Marshall J S, Palmer W M K. The distribution of raindrops with size. Journal of Meteorology, 1948, 5(4): 165-166.
- [9] Takeuchi D M. Characterization of raindrop size distributions. In: Cloud Physics and Atmospheric Electricity. Issaquah: American Meteorological Society, 1978: 154-161
- [10] Ulbrich C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1983, 22(10): 1764-1775.
- [11] Willis P T. Functional fits to some observed drop size distributions and parameterization of rain. Journal of the Atmospheric Sciences, 1984, 41(9): 1648-1661.
- [12] 熊飞麟. 拟合Gamma分布雨滴谱的研究. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [13] 霍朝阳, 阮征, 魏鸣, 等. 雨滴谱Gamma函数拟合方法的分析与评估. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 1-10.
- [14] 张洪胜, 何宏让, 张云, 等. 南京地区降水雨滴谱拟合模型的参数特征分析. 气象与环境学, 2017, 40(3): 71-78.
- [15] 于建宇, 李茂善, 阴蜀城, 等. 青藏高原那曲地区云降水微观特征雨滴谱分析. 成都信息工程大学学报, 2020, 35(2): 188-194.
- [16] Mehta S, Singh S, Mitra A, et al. Modeling of raindrop size distribution observed using micro rain radar over Darjeeling (27.05°N, 88.26°E): an Eastern Himalayan Region. Pure and Applied Geophysics, 2020, 177(1): 2959-2976.
- [17] 潘晓, 傅云飞. 夏季青藏高原深厚及浅薄降水云气候特征分析. 高原气象, 2015, 34(5): 1191-1203.
- [18] 常伟. 青藏高原那曲地区夏季云微物理特征和降水形成机制的飞机观测研究. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.
- [19] 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. 干旱气象, 2017, 35(3): 439-445.
- [20] 傅云飞, 潘晓, 刘国胜, 等. 基于云亮温和降水回波顶高度分类的夏季青藏高原降水研究. 大气科学, 2016, 40(1): 102-120.
- [21] 柳臣中, 周筠珺, 谷娟, 等. 成都地区雨滴谱特征. 应用气象学报, 2015, 26(1): 112-121.
- [22] 李腹广, 王芬. 用天气雷达回波强度资料估测降水. 气象科技, 2007(2): 286-288.
- [23] 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. 大气科学, 2006(4): 693-702.
- [24] 李山山, 王晓芳, 万蓉, 等. 青藏高原东坡不同海拔区域的雨滴谱特征. 高原气象, 2020, 39(5): 899-911.
- [25] Seela B K, Janapati J, Lin P L, et al. Raindrop size distribution characteristics of summer and winter season rainfall over North Taiwan. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(20): 11, 602-11, 624.
- [26] Wu Z, Zhang Y, Zhang L, et al. Characteristics of summer season raindrop size distribution in three typical regions of Western Pacific. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2019, 124(7): 4054-4073.
- [27] Wen L, Zhao K, Wang M, et al. Seasonal variations of observed raindrop size distribution in East China. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(4): 346-362.
- [28] 黄兴友, 印佳楠, 马雷, 等. 南京地区雨滴谱参数的详细统计分析及在天气雷达探测中的应用. 大气科学, 2019, 43(3): 691-704.
- [29] Wang Y, Zheng J, Cheng Z, et al. Characteristics of raindrop size distribution on the Eastern slope of the Tibetan Plateau in summer. Atmosphere, 2020, 11(6): 562.