

DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0075

WANG Yun, WANG Xu, LIAO Feijia, et al. Micro-structural characteristics of raindrop spectra of precipitation in the Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 695-701. [王昀, 王旭, 廖飞佳, 等. 新疆天山山区降雨的微物理结构特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 695-701.]

新疆天山山区降雨的微物理结构特征

王昀¹, 王旭², 廖飞佳², 王式功¹, 赵战成³

(1. 兰州大学 大气科学学院, 甘肃 兰州 730001; 2. 新疆维吾尔自治区人工影响天气办公室, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 新疆巴州气象局, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 使用 GBPP-100 型雨滴谱仪, 于 2001 年 6 月 12 日至 7 月 31 日在天山北坡的小渠子气象站和牧业气象试验站, 对 27 次降雨过程进行了雨滴谱观测, 共获取了 4 719 个雨滴谱样本。通过观测资料分析新疆中天山山区积状云、层状云、积状-层状混合云降雨的微物理结构特征。观测分析表明, 天山山区降雨雨滴的平均直径 0.41~0.55 mm, 以积状云最大, 混合云次之, 层状云最小。最大平均直径 0.88~1.12 mm、平均雨强 1.18~2.78 mm·h⁻¹、平均含水量 5.23~11.62 g·m⁻³, 混合云的这三个特征量均为最大。三类云的雨强与数密度呈正相关。积状云、层状云降雨的雨滴谱服从 M-P 分布, 混合云服从 Γ 分布。由于山区地形的作用, 使云中降雨粒子的生长时间受到限制, 天山山区降雨小滴浓度高、尺度小, 人工降雨潜力大。

关键词: 天山山区; 雨滴谱; 数密度; 雨强

中图分类号: P426.62⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)04-0695-07

0 引言

新疆地处西北内陆干旱区, 山地占土地面积的 40%, 盆地平原区占 60%。新疆年总降水 178 mm, 山区年降水为 150 mm 占总雨量的 84.3%, 盆地平原区年降水为 28 mm 占总雨量的 15.7%^[1]。因而, 山区降水是该干旱区所有形式的地表水和地下水体的主要补给源, 不仅决定着该干旱区水资源总量, 而且降水的空间和时间变化直接影响该干旱区的水分布状况、河川径流量与分布、地下水的天然补给、高山冰川积雪分布和发育^[2-11]。天山山脉横贯新疆, 山区降水是两侧盆地水资源的重要补给源, 通过人工增雨作业开发天山山区丰富的云水资源, 需要对天山山区的云水状况进行分析研究。

利用雨滴谱仪器观测云雾降水微物理结构状况, 并进行分析研究, 了解云雾降水的发生、发展过程, 是云雾降水物理学以及人工增雨技术的一种重要手段。云雾降水的微物理参数观测和研究, 旨

在加深云雾降水微物理过程的认识, 从而改进数值模式中云微物理参数化方案和指导人工影响天气作业^[12]。自开展现代云雾降水物理学和人工影响天气工作以来, 人们在雨滴谱研究方面已取得了显著的研究成果。国内利用 GPBB-100、THIES、OTT 雨滴谱仪在陆地的平原和山区以及海洋上对降水粒子谱进行了观测研究, 取得了大量的研究成果^[13-17], 但结果能否在新疆天山山区应用, 还需验证。为了保障乌鲁木齐市城市用水的供给, 自 2015 年开始, 每年夏季在新疆中天山开展地面人工增水业务工作。迄今为止, 仅在 2001 年夏季 6 月至 7 月, 利用 GPBB-100 雨滴谱仪在新疆中天山的小渠子气象站和牧业气象站分别进行了雨滴谱的外场观测试验。通过对该次获得的外场观测资料的分析, 探究天山山区各种类型云降雨的雨滴谱特征, 不仅能够为该区域地面人工增水业务工作提供指导, 也能为今后外场观测获得的资料提供比对。因而对其进行分析具有重要的科学意义。

收稿日期: 2017-12-25; 修订日期: 2018-07-10

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY201306047); 新疆维吾尔自治区人民政府重大专项课题(TUHA201516)资助

作者简介: 王昀(1990-), 女, 河南洛阳人, 现为兰州大学在读博士研究生, 从事极端天气与气象灾害研究。

E-mail: yunwang@vip.163.com

通信作者: 廖飞佳, E-mail: xj_liaohao@sina.cn.

1 材料与方法

雨滴谱观测中,使用 GBPP-100 型雨滴谱仪对降雨过程连续进行全谱测量。GBPP-100 型雨滴谱仪采用激光光阵排列法,通过光学二极管对经过的降雨粒子进行探测,共有 62 个通道,测量范围为 0.2 ~ 12.4 mm,一次采样时间一般为 10 ~ 30 s,在开机观测进行两小时后,关机半小时,再进行观测。观测点分别设在中天山乌鲁木齐河流域的小渠子气象站和牧业气象试验站,两站隔山南北分布,直线距离约 25 km,海拔高度分别为 2 160 m 和 2 350 m。观测中将降水云系划分为积状云、层状云和积状-层状混合云等三种云系,2001 年 6 月 12 日至 7 月 4 日在小渠子进行了 23 d 的雨滴谱观测,取得 1 797 份雨滴谱样本。2001 年 7 月 6 日至 7 月 31 日在牧业气象试验站进行了 26 d 的雨滴谱观测,取得了 2 922 份雨滴谱样本。在进行雨滴谱观测的同时,又进行了测雨雷达观测和冰核观测。对直径大于 3 mm 雨滴进行形变误差订正,重叠误差是由 GBPP-100 工作原理造成的,目前尚无较好的解决办法,暂不考虑这种误差的影响^[16]。

对观测得到的雨滴谱分别计算了平均直径、均平方根直径、均立方根直径,平均雨强、平均含水量和雨滴数密度。平均直径是雨滴直径按数密度加权平均,可表示雨滴的大致线度。平均直径计算公式为:

$$\bar{D} = \sum n_i D_i / \sum n_i \quad (1)$$

均平方根直径是雨滴直径的平方按数密度加权平均的开方,其平方可表示雨滴的平均截面。均平方根直径计算公式为:

$$\bar{D} = \sqrt{\sum n_i D_i^2 / \sum n_i} \quad (2)$$

均立方根直径是雨滴直径的立方按数密度加权平均的开立方,其立方可表示雨滴的平均体积或质量。均立方根直径计算公式为:

$$\bar{D} = \sqrt[3]{\sum n_i D_i^3 / \sum n_i} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: n_i 为雨滴数密度; D_i 为雨滴直径(单位:mm)。

用最小二乘法对积状云、层状云和混合云(积状-层状)雨滴谱分别进行 M-P 分布与 Γ 分布拟合。

M-P 分布形式为:

$$n = n_0 e^{-\lambda D} \quad (4)$$

Γ 分布形式为:

$$n = n_0 D^\mu e^{-\lambda D} \quad (5)$$

式(4)、(5)中: n 为雨滴密度分布函数; D 为雨滴直径(单位:mm); n_0 、 λ 为雨滴谱分布参数; μ 为形状因子。

采用平均相对误差对拟合结果进行定量评估,计算公式为:

$$W = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{n_{ci} - n_{li}}{n_{li}} \quad (6)$$

式中: n_{ci} 和 n_{li} 分别表示雨滴数密度的拟合值和观测值, $i=1, 2, \dots, N$,其中 N 为计算样本数。

2 结果与分析

2.1 降雨微物理结构特征

2001 年 6 月至 7 月,使用 GPBB-100 雨滴谱仪对天山山区降雨进行了 27 次的雨滴谱观测,共获得 4 719 个样本。积状云降雨 8 次,835 个样本,雨滴平均直径 0.55 mm,最大平均直径 1.09 mm,平均雨强 2.17 mm · h⁻¹,平均含水量 6.07 g · m⁻³;层状云降雨 10 次,2 304 个样本,雨滴平均直径 0.41 mm,最大平均直径 0.88 mm,平均雨强 1.18 mm · h⁻¹,平均含水量 5.23 g · m⁻³;混合云降雨 9 次,1 580 个样本,雨滴平均直径 0.51 mm,最大平均直径 1.12 mm,平均雨强 2.78 mm · h⁻¹,平均含水量 11.62 g · m⁻³(表 1)。

从以上观测结果可以看出,天山山区降雨雨滴的平均直径以积状云最大,混合云次之,层状云最小,之间相差 7% ~ 25%。雨滴的最大平均直径、平均雨强和平均含水量,混合云降雨最大,积状云次之,层状云最小,混合云降雨的这三个特征量均比单是积状云或层状云降雨的要大,积状云降雨的这三个特征量要大于层状云降雨。混合云降雨通常是较强的天气系统来临时产生的,一般来讲,前部为积状云降水,中部和后部为层状云降水,前部有大量的积状云发展,而后才是层状云移过,成雨机制发展比较完善,因此雨滴最大平均直径、雨强和含水量均大于积状云、层状云降雨。

2.2 平均直径、雨强和数密度的关系

对于积状云,通常在降雨过程中,雨强和数密度随时间分布基本一致。一般在中、前部出现一个最大峰值,但随时间分布平均直径的起伏较强烈。平均直径较大时,雨强并不是最大,雨强大时,降雨平均直径偏小(图 1)。说明积状云在发展旺盛时,由于雨滴在下落过程中,云中对流强烈、扰动大,存在着碰撞-破碎机制,雨滴的直径不会很大,而数密度会较多,因此形成较大的雨强。雨强与数

表 1 三类降雨云的雨滴谱特征量
Table 1 The characteristic values of raindrops for the three precipitation clouds

观测地点	观测日期	观测时段	最大平均直径/mm	平均直径/mm	均平方根直径/mm	均立方根直径/mm	雨强/(mm·h ⁻¹)	含水量/(g·m ⁻³)	样本数	降雨云类型
小渠子	2001-06-12	16:29:23 - 22:40:27	0.86	0.57	5.30	15.09	18.02	78.30	523	C-S
气象站	2001-06-14	20:09:32 - 22:44:45	0.90	0.46	12.41	56.89	5.48	15.78	233	C
	2001-06-22	15:24:33 - 15:42:55	2.12	0.47	0.12	0.39	0.37	1.18	92	C-S
	2001-06-23	09:39:36 - 13:40:53	0.53	0.35	2.67	15.99	2.67	15.99	311	S
	2001-06-23	16:27:05 - 20:20:14	0.75	0.53	2.89	9.65	2.89	9.65	262	S
	2001-06-24	13:40:58 - 15:14:50	1.03	0.50	0.23	0.98	0.23	0.98	118	C-S
	2001-06-25	14:19:42 - 14:41:05	0.56	0.47	0.08	0.37	0.08	0.37	40	S
	2001-06-26	17:11:02 - 17:18:05	0.93	0.50	0.06	0.20	0.06	0.20	14	C-S
	2001-06-28	16:31:27 - 16:54:07	1.22	0.39	0.03	0.11	0.03	0.11	32	C-S
	2001-07-02	17:22:03 - 17:53:53	1.13	0.37	0.01	0.08	0.01	0.23	107	S
	2001-07-03	22:02:54 - 22:38:17	1.15	0.38	0.44	1.25	0.44	1.25	65	C
牧业气象	2001-07-08	15:19:06 - 16:28:46	0.78	0.56	0.10	0.41	0.10	0.41	23	C-S
试验站	2001-07-10	20:17:35 - 21:33:53	1.25	0.73	1.10	3.64	1.10	3.64	102	C
	2001-07-12	18:04:39 - 21:16:43	0.78	0.49	1.90	6.31	1.90	6.31	96	C
	2001-07-13	00:26:56 - 01:16:12	0.89	0.25	0.10	0.36	0.10	0.36	35	S
	2001-07-13	08:55:46 - 09:24:43	0.73	0.51	0.25	0.95	0.25	0.95	53	S

注: 表中 C 代表积状云; S 代表层状云; C-S 代表混合云。

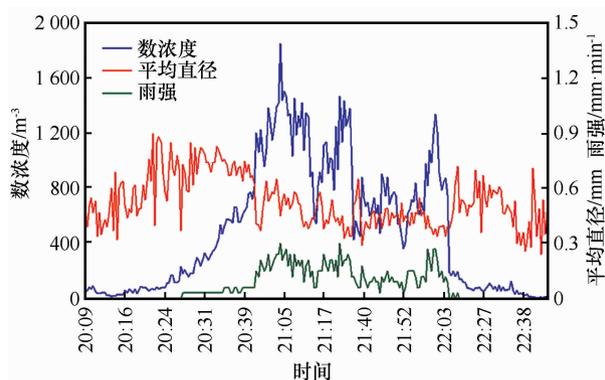


图 1 2001 年 6 月 14 日积状云降雨雨强、数密度和平均直径随时间的演变

Fig. 1 The evolutions of rain intensity, number density and average diameter of cumulus cloud precipitation on June 14, 2001

密度和平均直径的相关系数分别为 0.9492 和 -0.2864, 两个相关系数均通过信度 0.001 的显著性检验。相关系数的大小和正负表明, 雨强与数密度关系紧密, 呈正相关, 雨强与平均直径呈反相关。

在层状云中, 降雨过程较为稳定, 雨滴的平均直径、数密度虽然有较大的起伏, 但雨强随时间分

布基本上平缓, 与数密度的分布相对应(图 2), 但有时也出现较大的雨强。在出现较大雨强时, 降雨过程与积状云相似。估计是对流泡体的作用, 在对流泡体存在的条件下, 平均直径与雨强、数密度的关系有点像积状云降雨。雨滴平均直径随时间分布有明显起伏变化, 但不是太剧烈, 与雨强和数密度无明显的对应。雨强与数密度和平均直径的相关系数分别为 0.7103 和 -0.0231, 前者通过信度 0.001

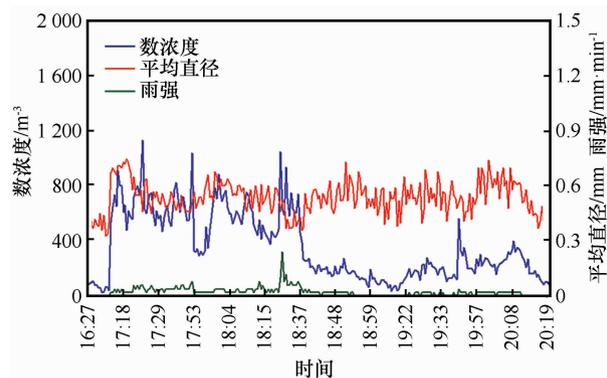


图 2 2001 年 6 月 23 日层状云降雨雨强、数密度和平均直径随时间的演变

Fig. 2 The evolution of rain intensity, number density and average diameter of stratus cloud precipitation on June 23, 2001

的显著性检验,后者没有通过信度 0.1 的显著性检验。相关系数的大小表明,雨强与数密度呈正相关,雨强与平均直径不相关。

混合云降雨过程中,雨滴平均直径随时间起伏较层状云明显,与雨强、数密度随时间的变化相似(图 3)。当平均直径大时雨强、数密度也大,平均直径小时雨强、数密度也随之变小。这可能是测站地处山区,由地形动力和热力形成的积状云,与天气系统产生的层状云相混合,形成混合云降雨,由于大气动力和热力条件的差异,使得混合云降雨雨滴微结构特征与纯层状云降雨有所差异,这需要进一步观测研究加以证实。雨强与数密度和平均直径的相关系数分别为 0.7716 和 0.5664,两个相关系数均通过信度 0.001 的显著性检验。雨强与数密度和平均直径均呈正相关,且雨强与数密度关系紧密。

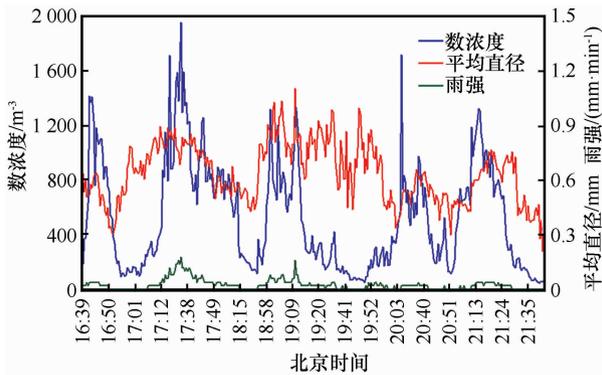


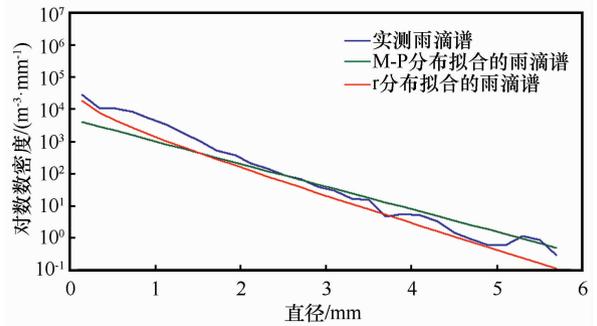
图 3 2001 年 7 月 25 日混合云降雨雨强、数密度和平均直径随时间的演变

Fig. 3 The evolution of rain intensity, number density and average diameter of mixed cloud precipitation over time on July 25, 2001

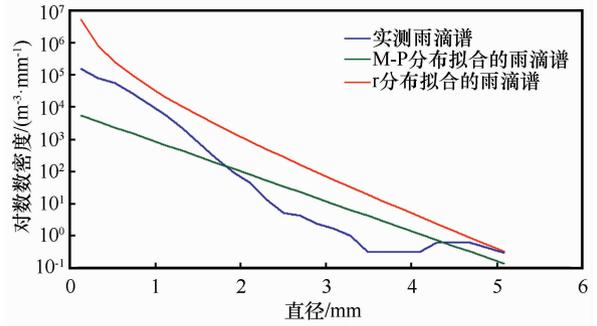
2.3 雨滴谱分布特征

对天山山区 3 类降雨云进行平均雨滴谱分析,发现积状云降雨谱分布最宽,次之为层状云降雨,最窄的是混合云降雨,并且天山山区降雨的雨滴密度,积状云要小于层状云和混合云(图 4)。在积状云降雨中,较常出现直径大于 6 mm 的大滴,层状云降雨和混合云降雨偶而有直径大于 6 mm 的大滴出现。混合云降雨中直径小于 2 mm 的雨滴数密度最多,而积状云的大滴数密度较大(表 2)。说明积状云降雨雨强主要是大滴的贡献,层状云和混合云降雨雨强主要以小滴为主。3 类降雨云雨滴谱在大滴段均呈多峰结构(图 4)。

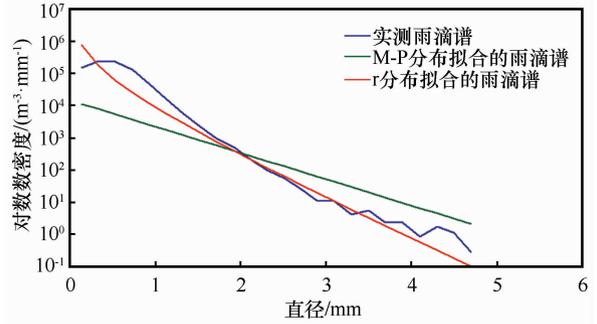
分别用最小二乘法对 3 类云降雨总的雨滴谱进行 M-P 分布与 Γ 分布拟合的结果见表 3。拟合结果



(a) 积状云雨滴谱分布



(b) 层状云雨滴谱分布



(c) 积状-层状混合云雨滴谱分布

图 4 三类降雨云的雨滴谱分布

Fig. 4 The raindrop size distributions of cumulus cloud rainfall (a), stratified cloud rainfall (b) and mixed cloud rainfall (c)

表 2 三类降雨云平均数密度

Table 2 The mean number densities of the three precipitation clouds $m^{-3} \cdot mm^{-1}$

直径/mm	0.000 ~ 2.000	2.001 ~ 4.000	4.000 ~ 6.000
积状云	7 111.0	63.0	1.6
层状云	32 866.0	7.0	0.5
混合云	91 483.0	45.0	1.0

表明,天山山区积状云降雨雨滴谱的 M-P 分布拟合误差仅为 Γ 分布的 28%, M-P 分布拟合较好。层状云降雨雨滴谱的 M-P 分布拟合误差仅为 Γ 分布的 10%, M-P 分布拟合较好。混合云降雨 Γ 分布拟合误差仅为 M-P 分布的 6%, Γ 分布拟合较好。说明在天山山区积状云、层状云降雨的雨滴谱可以用 M-P 分布形式来进行表示,混合云降雨的

表3 三类降雨云雨滴谱分布的拟合方程
Table 3 The fitting equations of raindrop size distribution of the three precipitation clouds

降雨云种类	拟合方程	分布	平均相对误差
积状云	$n = 5 \ 156.6692e^{-1.6225D}$	M-P	0.1292
	$n = 8 \ 482.6634D^{-0.5377}e^{-1.8079D}$	Γ	-0.4537
层状云	$n = 7 \ 177.4087e^{-2.1366D}$	M-P	1.9552
	$n = 284 \ 205.9671D^{-1.6308}e^{-2.1688D}$	Γ	18.7976
积状云-层状云	$n = 16045.5010e^{-1.8918D}$	M-P	1.6131
	$n = 138 \ 650.4795D^{1.1123}e^{-2.6321D}$	Γ	-0.1004

雨滴谱可以用 Γ 分布形式来进行表示。

3 讨论

2001年6月至7月,在天山乌鲁木齐河流域的小渠子气象站和牧业气象试验站山区雨滴谱的观测结果与国内平原观测结果有较明显差异。1994年宫福久等^[16]在沈阳观测的雨滴平均直径层状云0.61 mm,积状云0.46 mm,混合云0.49 mm,1999年周毓荃等^[15]在唐河观测的层状云0.31 mm,积状云0.30 mm,而此次在天山山区观测的结果与上述观测不一致,具有天山山区自己的特点。

在天山山区积状云、层状云降雨的雨滴谱用M-P分布拟合效果好,混合云用 Γ 分布拟合效果好。陈宝君等^[17]、周毓荃等^[15]拟合结论是积状云、层状云、混合云降雨雨滴谱用 Γ 分布拟合效果好,所得的拟合结论与本文不相符。

小渠子气象站和牧业气象试验站所观测的雨滴平均直径为0.45 mm和0.50 mm、平均最大直径为1.02 mm和1.03 mm、平均雨强为2.75 mm·h⁻¹和1.49 mm·h⁻¹、平均含水量为11.28 g·m⁻³和5.09 g·m⁻³,两者之间有较明显的差异,可能原因是两站所处的地形环境对降雨产生的影响不同。由于观测时间较短,需要继续开展观测进行对比分析。

从各类云的平均雨滴谱以及降水各个阶段来看,与其他地区的观测结果相比,天山山区的降雨普遍具有小滴浓度高、尺度小的特点。根据国内外的经验,这是由于山区地形的作用,使云中降雨粒子的生长时间受到限制,使得降雨云的降水效率不高,因此根据人工催化原理,天山山区的云具有更大的人工降雨潜力。

由于测站地处天山山区,山区地形复杂,云降

雨过程受山区地形的影响,云中气流也随之改变,上升气流的加强或减弱,促使云体增长或减弱,使云降雨过程更加不均匀。因此对山区的云降雨过程而言,与平原地区的云降雨过程有很大的不同。由于外场试验时间只有2个月,天山山区地域广阔,南北坡环境条件也有差异,需要对天山山区云降雨微结构进行更加细致的研究,寻求适合天山山区实施人工增雨的云水条件。

4 结论

2001年6月至7月使用GPBB-100雨滴谱仪,对天山山区27次降雨过程的观测取得了4719个样本。统计计算表明,积状云雨滴平均直径、最大平均直径、平均雨强、平均含水量分别为0.55 mm、1.09 mm、2.17 mm·h⁻¹、6.07 g·m⁻³,层状云雨滴分别为0.41 mm、0.88 mm、1.18 mm·h⁻¹、5.23 g·m⁻³,混合云分别为0.51 mm、1.12 mm、2.78 mm·h⁻¹、11.62 g·m⁻³。天山山区降雨雨滴的平均直径以积状云最大,混合云次之,层状云最小,混合云降雨的雨滴其余特征量均比积状云或层状云降雨的大。这些特征参数与国内其他地区观测结果差异较大,反映了天山山区三类云雨滴谱的地方特色。

积状云降雨谱分布最宽,次之为层状云降雨,最窄的是混合云降雨。降雨的雨滴密度,积状云要小于层状云和混合云。混合云降雨中直径小于2 mm的雨滴数密度最多,而积状云的大滴数密度较大。与其他地区的观测结果相比,天山山区的降雨普遍具有小滴浓度高、尺度小的特点。由于山区地形的作用,使云中降雨粒子的生长时间受到限制,使得降雨云的降水效率不高,天山山区的云具有更大的人工降雨潜力。

雨强、数密度和平均直径三者之间关系较为复

杂。积状云的雨强与数密度呈正相关,雨强与平均直径呈反相关;层状云雨强与数密度呈正相关,雨强与平均直径不相关;混合云雨强与数密度和平均直径均呈正相关。天山山区积状云、层状云降雨的雨滴谱服从 M-P 分布,混合云服从 Γ 分布。

参考文献 (References):

- [1] Tian Changyan, Song Yudong, Hu Mingfang. Status, causes and countermeasures of desertification in Xinjiang[J]. *Journal of Desert Research*, 1999, 16(3): 214–217. [田长彦, 宋郁东, 胡明芳. 新疆荒漠化现状、成因及对策[J]. 中国沙漠, 1999, 16(3): 214–217.]
- [2] Gao Qianzhao, Shi Shengsheng, Wen Peian, et al. Water resources in the arid zone of Northwest China[J]. *Journal of Desert Research*, 1992, 12(4): 1–11. [高前兆, 史胜生, 温培安, 等. 中国西北干旱地区的水资源[J]. 中国沙漠, 1992, 12(4): 1–11.]
- [3] Wang Hongwei, Huang Chunlin, Hao Xiaohua, et al. Analyses of the spatiotemporal variations of snow cover in North Xinjiang [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 508–516. [王宏伟, 黄春林, 郝晓华, 等. 北疆地区积雪时空变化的影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 508–516.]
- [4] Mamattursun Eziz, Hamid Yimit, Ma Rong. Analyzing the variation and driving forces of the runoff in Yanqi Basin, Xinjiang during 1956–2010[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 670–677. [麦提吐尔逊·艾则孜, 海米提·依米提, 马蓉. 1956–2010 年新疆焉耆盆地径流变化特征及驱动力分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 670–677.]
- [5] Sun Yue, Li Dongliang. Features and response to climate-driven factors of the runoff in the upper reaches of the Weihe River during 1975–2011 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(2): 413–423. [孙悦, 李栋梁. 1975–2011 年渭河上游径流演变规律及对气候驱动因子的响应[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 413–423.]
- [6] Nuerlan Hazaiz, Shen Yongping, Mahat Mulatibiek. Impacts of climate change on hydrological processes in the Ulungur River watershed, Altay Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 699–705. [努尔兰·哈再孜, 沈永平, 马哈提·穆拉提别克. 气候变化对阿尔泰山乌伦古河流域径流过程的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 699–705.]
- [7] Zhou Jingwu, Abulimiti Ablikim, Mao Weiye, et al. The responses of the runoff processes to climate change in the Qingshuihe River watershed on the southern slope of Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 685–690. [周京武, 阿不力米提·阿不力克木, 毛炜峰, 等. 天山南坡清水河流域径流过程对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 685–690.]
- [8] Abulimiti Ablikim, Zhou Jingwu. Surface discharge characteristics of the Turpan Basin, Xinjiang [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 717–723. [阿不力米提·阿不力克木, 周京武. 新疆吐鲁番盆地地表径流特征[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 717–723.]
- [9] He Yi, Yang Taibao, Ji Qin, et al. Comparative analysis of glacier changes between eastern and western part of Northern Tianshan from 1989 to 2011 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(6): 105–110. [何毅, 杨太保, 冀琴, 等. 1989–2011 年北天山东西段冰川变化对比分析研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(6): 105–110.]
- [10] Wei Tianfeng, Liu Zhihui, Yao Junqiang, et al. Response of Hutubi river runoff process on climate change [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(4): 102–107. [魏天锋, 刘志辉, 姚俊强, 等. 呼图壁河径流过程对气候变化的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(4): 102–107.]
- [11] Niu Shengming, Li Zhongqin, Huai Baojuan. Glaciers changes in Bogeda region, Tianshan in the last 50 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(9): 134–138. [牛生明, 李忠勤, 怀保娟. 近 50 年来天山博格达峰地区冰川变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 134–138.]
- [12] Wang Donghai, Yin Jinfang, Zhai Guoqing. In-situ measurements of cloud-precipitation microphysics in East Asian monsoon region since 1960 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(4): 639–657. [王东海, 尹金方, 翟国庆. 1960 年以来东亚季风区云降水微物理的直接观测研究[J]. 气象学报, 2014, 72(4): 639–657.]
- [13] Zhou Liming, Wang Jun, Gong Dianli, et al. Characteristics of particle spectrum during the snowstorm process in early winter 2009 in Shandong Province [J]. *Meteorological Monthly*, 2014, 40(1): 59–65. [周黎明, 王俊, 龚佃利, 等. 2009 年初冬山东一次暴雪过程粒子谱特征分析[J]. 气象, 2014, 40(1): 59–65.]
- [14] Hu Zihao, Pu Jiangping, Pu Yuntao, et al. Analysis on raindrop size distribution characteristics of maritime convective cloud rain in South China Sea [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 30(1): 181–188. [胡子浩, 濮江平, 濮云涛, 等. 南海一次海洋性对流云降水雨滴谱特征分析[J]. 热带气象学报, 2014, 30(1): 181–188.]
- [15] Zhou Yuquan, Liu Xiaotian, Zhou Feifei, et al. Characteristics of surface raindrop spectra in drought years in Henan Province [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorological Science*, 2001, 12(Suppl 1): 39–47. [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 1): 39–47.]
- [16] Gong Fujiu, Liu Jicheng, Li Zihua. Study of the raindrop size distributions for three types of precipitation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1997, 21(5): 607–614. [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.]
- [17] Chen Baojun, Li Zihua, Liu Jicheng, et al. Model of raindrop size distribution in three types of precipitation [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, 56(4): 506–512. [陈宝君, 李子华, 刘吉成, 等. 三类降水云雨滴谱分布模式[J]. 气象学报, 1998, 56(4): 506–512.]

Micro-structural characteristics of raindrop spectra of precipitation in the Tianshan Mountains

WANG Yun¹, WANG Xu², LIAO Feijia², WANG Shigong¹, ZHAO Zhancheng³

(1. College of Atmospheric Sciences of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Xinjiang Weather Modification Office, Ürümqi 830002, China; 3. Bazhou Meteorological Bureau of Xinjiang, Korla 841000, China)

Abstract: Using GBPP-100 Surface Raindrop Spectrometer (PMS Co.), 27 rainfall events were monitored continuously from June 12 to July 31, 2001. A total of 4 719 raindrop spectrum samples was obtained in Xiaoquzi Weather Station and animal husbandry weather test station on the north slopes of the Tianshan Mountains. Micro-structural characteristics of raindrop spectra of cumulus, stratus and merging cloud precipitation processes in the Tianshan Mountains were analyzed based on these observation data. Observation and analysis showed that the average diameter of the raindrops of precipitation in the Tianshan Mountains was 0.41 ~ 0.55 mm. Diameter of the raindrops of the cumulus cloud was the maximum, followed by the merging cloud and then by the stratus cloud. In addition, the maximum average diameter of raindrop was 0.88 ~ 1.12 mm, the average rainfall intensity was 1.18 ~ 2.78 mm · h⁻¹ and the average water content was 5.23 ~ 11.62 g · m⁻³. These three characteristic values for stratus cloud were the maximum. Furthermore, rainfall intensity of the three clouds was positively correlated with number density. The raindrop size distribution of cumulus and stratus cloud followed M-P distribution, while that of merging cloud followed Γ distribution. Due to mountainous terrain, the growth time of precipitation particle in cloud was limited. Therefore, the high concentration and small-scale of the rain droplets in the Tianshan Mountains make artificial rainfall has great potential.

Key words: Tianshan Mountains; raindrop spectrum; number density; rainfall intensity

(本文编辑: 庞瑜, 周成林)