

党张利,马思敏.六盘山区夏季一次层状云降水成因及宏微观特征分析[J].气象研究与应用,2023,44(2):75–80.

Dang Zhangli, Ma Simin. Analysis of the causes and macrophysical and microphysical in a summer stratiform precipitation over the Liupan Mountain[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(2): 75–80.

六盘山区夏季一次层状云降水成因及宏微观特征分析

党张利^{1,2}, 马思敏^{1,2}

(1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002;

2. 宁夏回族自治区人工影响天气中心, 银川 750002)

摘要: 利用六盘山区 1 部 X 波段双偏振雷达、3 部 ka 波段云雷达、3 部 Parsivel2 雨滴谱仪的观测资料, 分析了六盘山区夏季一次层状云降水成因及降水云系宏微观变化特征。结果表明, 受锋面过境影响, 六盘山区降水的时间和空间差异较大, 降水云系反射率因子在 20~36 dBZ 之间, 差分反射率因子在 0~3.5 dBZ 之间, 受阵性降水影响双偏振雷达显示相关系数均值在 0.5~0.8 之间; 此次降水雨滴的等效直径较小, 雨滴谱数浓度与等效直径随海拔高度增加分别呈现增大和减小趋势, 由于山顶距离云底较近或在云内, 小雨滴的浓度较大, 随着降水的发生, 西坡雨滴的谱型发生变化, 而东坡谱型未发生变化, 说明西坡由于碰并和小雨滴的蒸发, 出现较强的阵性降水, 与实况降水表现一致。

关键词: 六盘山区; 层状云降水; 双偏振雷达; 雨滴谱

中图分类号: P426

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.2.13

引言

云宏微观结构变化与降水和人工增雨雪关系密切, 尤其是层状云降水云系是我国大部分地区人工增雨雪的作业目标^[1], 随着探测技术的发展, 利用人影特种观测设备对人工增雨雪作业目标进行研究^[2], 基于国内外云宏微观探测设备的应用, 也取得了一系列成果, 樊曙先等^[3]和王研峰等^[4]利用飞机探测资料对层状云系微观物理特征进行了分析, 发现云滴浓度与平均直径呈负相关, 高层云的小云粒子浓度低, 低云粒子浓度高, 液态含水量高; 丁建芳等^[5]和程鹏等^[6]对河南、甘肃降水云系的雨滴谱特征进行了分析, 发现层状云降水雨滴谱分布较窄, 雨滴谱数浓度随着海拔高度增加呈增加趋势, 而等效直径随着海拔高度增加呈减小趋势; 周非非等^[7]利用微波辐射计对层状云系进行分析, 发现层状云系不同部位的宏微观结构和降水特征都存在不均匀性。

六盘山区位于宁夏固原市, 属季风区的边缘, 西临青藏高原, 西南部为四川盆地, 东南部为秦岭。近

几年随着六盘山大气科学野外观测研究站的不断完善, 对六盘山区云降水特征有一些研究, 发现六盘山区夏秋季大气水汽含量和液态水含量均较高^[8], 同时利用微雨雷达和云雷达对层状云特征进行分析, 发现地形强迫使山脊降水云的物理和动力过程较山谷更剧烈^[9-10]。不同地区、不同天气背景云的宏微结构具有明显的差异, 为了对六盘山区层状云宏微观结构特征有更清晰的认识, 本文利用六盘山大气科学野外试验基地布设的 X 波段双偏振雷达、云雷达、雨滴谱仪观测设备, 对 2021 年 6 月 13—17 日六盘山区降水成因和降水云系垂直、水平宏微观变化特征进行分析, 为科学选择人影作业条件、分析作业效果提供依据。

1 数据处理

1.1 研究区域和观测设备

本研究区域为宁夏固原市六盘山站 (山顶)、大湾人影作业点 (东侧)、隆德站 (西侧), 观测的雨滴谱仪为 OTT 公司生产的 Parsivel2 激光雨滴谱探测系

收稿日期: 2022-11-15

基金项目: 宁夏自然科学基金项目 (2021AAC03489)、中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室项目 (CAMP-202106)

作者简介: 党张利 (1988—), 女, 工程师, 主要从事人工影响天气方面的研究。E-mail: 1336833529@qq.com

统;山顶和东西两侧还布设了 3 部 Ka 波段毫米波云雷达;固原市彭阳县孟塬人影作业点 (35°59'N, 106°49'E) 布设了一部 PR11D 型 X 波段双偏振雷达,通过三类观测设备对六盘山区层状云宏微观特

征进行分析,仪器具体站点布局如表 1。同时还使用了 ERA5 再分析资料,资料的时间分辨率为 1h,水平分辨率为 0.25°×0.25°,垂直分辨率为 37 层 (1000hPa 到 1hPa)。

表 1 六盘山区地形云试验基地特种观测设备经纬度和海拔高度

仪器类型	站名	经度/°	纬度/°	海拔高度/m
雨滴谱仪	六盘山站(山顶)	106.20	35.66	2845.2
	隆德站(西坡)	106.11	35.61	2078.6
	大湾人影作业点(东坡)	106.26	35.70	1980
X 波段双偏振雷达	孟塬人影作业点	106.84	35.98	1758
Ka 波段云雷达	六盘山站(山顶)	106.20	35.66	2845.2
	隆德站(西坡)	106.11	35.61	2078.6
	大湾人影作业点(东坡)	106.26	35.70	1980

1.2 数据处理方法

本文主要对 OTT 雨滴谱仪数据进行处理,其中,公式(1)是计算雨滴谱分布函数 $N(D_i)$,

$$N(D_i)=\sum_{j=1}^{32}\frac{n_{ij}}{A_i\cdot\Delta t\cdot V_j\cdot\Delta D_i}\tag{1}$$

其中, D_i 为第 i 档的体积等效直径, A_i 为每档粒子的有效采样面积, Δt 为采样间隔, V_j 为第 j 速度等级对应的平均速度, $\Delta D_i=D_{i+1}-D_i$ 。

利用雨滴谱仪观测数据,公式(2—3)计算雨滴谱数浓度和质量等效直径,

$$N_T=\sum_{i=1}^{32}\sum_{j=1}^{32}\frac{n_{ij}}{A_i\cdot\Delta t\cdot V_j}\tag{2}$$

$$D_m=\frac{\sum_{i=1}^{32}N(D_i)\cdot D_i^4\cdot\Delta D_i}{\sum_{i=1}^{32}N(D_i)\cdot D_i^3\cdot\Delta D_i}\tag{3}$$

其中, N_T 为雨滴谱数浓度, D_m 为滴谱分布的质量等效直径。

2 结果与分析

2.1 天气背景分析

2.1.1 天气形势

6 月 13 日至 17 日六盘山区出现一次持续的降水天气过程。降水发生前(13 日 20 时),六盘山区处于槽底西南气流,随着降水的开始,贝加尔湖附近的低涡东移南压加强,东北浅槽增强,14 日 08 时东北浅槽移至六盘山区边缘,受陕西中部低涡切变影响,六盘山区出现降水,14 日 20 时低涡继续维持在贝加尔湖西北侧,东北浅槽维持在内蒙古至辽宁一带,

低涡切变东移减弱,影响六盘山区的天气系统移出,第一阶段降水结束。15 日 20 时贝加尔湖附近低涡东移南压,低涡中心高度为 5556m,冷中心强度为 -26℃,其底部短波槽影响六盘山区,东北冷涡后部冷平流和高原低涡前部暖平流在六盘山区相遇,形成较大量级降水,16 日 08 时贝加尔湖低涡东移南压,冷空气继续影响六盘山区,六盘山区位于冷暖平流交汇的后部,16 日 20 时东移南压的贝加尔湖低涡与东北冷涡重建成,切变线南压,六盘山区受短波槽影响还存在弱降水,17 日 20 时东北冷涡形成,六盘山区受槽后西北气流影响,降水结束。

2.1.2 环境场特征

根据平凉崆峒山探空资料分析可知,降水发生前中低层吹东南风,600hPa 相对湿度低于 80%,随着东北冷涡西北气流和高原低压偏南气流的影响,整层相对湿度增加,450hPa 以下相对湿度大于 85%,受冷涡后部西北气流的影响,低层以偏北风为主,相对湿度减弱,第一阶段降水趋于结束,随着东北冷涡的发展和低涡前部切变线的发展,15 日 20 时中低层以偏南风为主,相对湿度大于 90%,雨强增强,直至 17 日 08 时中低层转向偏北风,降水强度减弱,低涡切变线南压,17 日 20 时相对湿度减弱,降水结束。

对 15 日 20 时 ERA5 再分析资料沿 35°N~36°N 的垂直涡度剖面(如图 1)进行分析,发现六盘山区有一气旋性涡度从 800hPa 延伸到 300hPa,正涡度中心在 600hPa 附近,强度在 $1.5\sim2.0\times10^{-6}s^{-1}$ 之间,

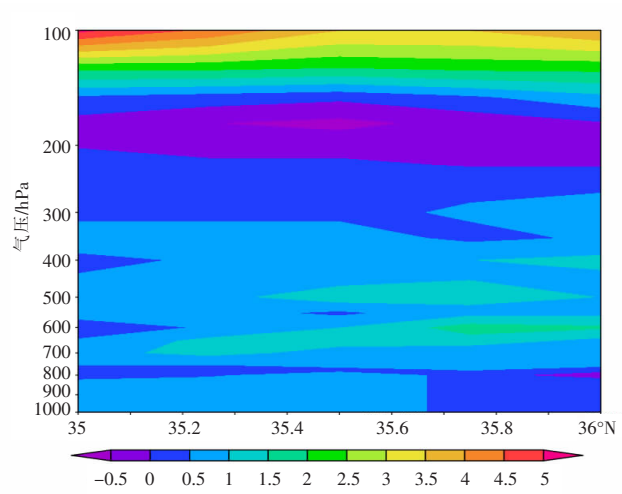


图 1 6 月 15 日 20 时沿 35°N~36°N 方向的垂直湿度剖面

200hPa 为负涡度,强度为 $-0.5\times10^{-6}\text{s}^{-1}$ 左右,垂直涡度的这种配置表示该过程低层辐合,中高层辐散,为六盘山区降水过程提供了所需要的抬升条件,从地面自动站气温和风速也可以印证,进一步表明,中尺度辐合为降水提供了动力条件,印证这一点的还有水汽通量散度场,低层正的水汽通量散度,高层负的

水汽通量散度,既表明了低层水汽辐合高层辐散的动力条件,从相对湿度剖面图显示 500hPa 以下六盘山区相对湿度较好,为降水提供了水汽条件。

2.2 云降水雷达回波特征

双偏振雷达从 15 日 14 时开始出现点状回波, 15 时降水云系前缘自西南向东北进入六盘山区南部,回波较弱,尚未连成片,15 日 16 时降水云系主体已经影响六盘山区,回波均匀,回波面积较大,没有明显的强回波中心,系典型的层状云回波特征,此时六盘山区的反射率因子平均值为 22.36dBZ,最大值为 32.5dBZ,差分反射率因子(如图 2a)平均值为 0.06dB,最大值为 3.25dB,差分传播相移最大值为 $8^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$,相关系数(如图 2c)最大值为 0.98,回波主体往东北方向移动;15 日 22 时在六盘山区偏南区域自西南至东北方向云系进入六盘山区,此时回波主体的反射率因子平均值为 25.96dBZ,最大值为 33.5dBZ,差分反射率因子最大值为 3.25dB,差分传播相移最大值为 $8^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$,相关系数最大值为 0.97,之后受分散状回波影响出现阵性降水,16 日 03 时自西南-东北方向出现片状回波,反射率因子平均

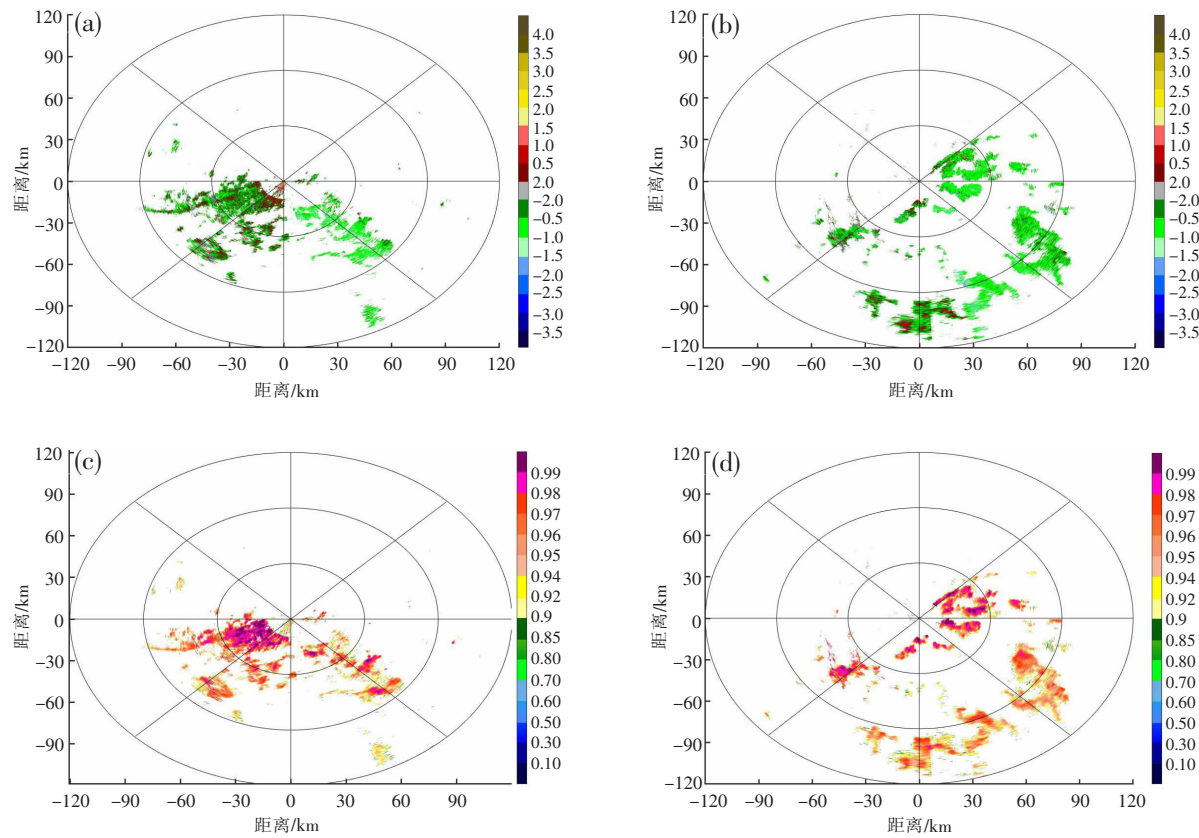


图 2 2021 年 6 月 15 日 16:03 和 16 日 03:00X 波段双偏振雷达差分反射率因子、相关系数分布图

(a)15 日 16:03 差分反射率因子;(b)16 日 03:00 差分反射率因子;(c)15 日 16:03 相关系数;(d)16 日 03:00 相关系数

值为 23.92dBZ,最大值为 36.5dBZ,差分反射率因子(如图 2b)最大值为 3.25dB,差分传播相移最大值为 $8^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$,相关系数(如图 2d)最大值为 0.99,强回波中心在隆德上空,16 日 06 时在西南方向出现范围更大、强度较弱的片状回波,位置在六盘山东南方向,17 日 08 时出现不连片的块状回波,回波强度在 20~25dBZ 之间,相关系数最大值大于 0.90,平均值为 0.68。

差分反射率因子最大值为 3.25dB,平均值在 0~1dB 之间,说明大部分降水粒子接近于球形,部分降水区降水粒子较大;相关系数最大值均大于 0.9,均值在 0.5~0.8 之间,主要受到阵性降水影响,差分传播相移最大值均为 $8^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$,符合降雨时的偏振雷达参量。

对应分析山顶和东西坡云雷达的云底高度和回波强度,整体上随着降水的开始,云底高度降低,云层数减少,雷达回波强度增大。15 日 16 时六盘山站能见度降低,根据云高仪显示的云底高度,在 16 时前六盘山站已在云内,隆德和大湾站云底高度明显降低,云底高度在 2000~2500km(绝对高度)处,由于 16 时至 17 时雨强最大,在云体内回波强度也有明

显的跃增现象,增加了 5~12dBZ,16 日 16 时云底高度开始在六盘山站接地,降水结束,云底高度升高,隆德站云底高度变化趋势与六盘山站一致。降水过程中六盘山站瞬时最大回波强度为 30dBZ,隆德站为 10dBZ 左右,在 3.5km 处有一较弱的 0°C 层亮带,为弱层状云降水,同时降水期间回波强度、信噪比、径向速度、速度谱宽等在雨强较强时变化较为剧烈。

2.3 云降水滴谱特征

受东北冷涡后部冷空气和高原低压前部暖湿空气共同影响,六盘山站(山顶)、大湾人影作业点(东测)和隆德站(西侧)均出现明显的降水天气,降水时间段为 6 月 13 日 20 时至 17 日 20 时,累计降水量在 6.0~19.5mm 之间,山顶和东西两侧降水量分布差异明显,表 2 是此次降水过程中各站点累计降水量(P)、最大降水强度(R_{max})、平均降水强度(R_{avg})、最大粒子数量(N_{max})、平均粒子数量(N_{avg})统计情况,可以看出,此次降水山顶累计降水量和粒子数量最大,西坡最大降水强度最大,而东西坡粒子数量差异较小,说明西坡存在短时阵性降水,累计降水量和降水强度取决于滴谱分布。

表 2 2021 年 6 月 13 日 20 时至 17 日 20 时降水过程各个站点降水量统计情况

站点	P/mm	$R_{\text{max}}/\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	$R_{\text{avg}}/\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	$N_{\text{max}}/\text{个}$	$N_{\text{avg}}/\text{个}$
隆德站(西坡)	11.6	4.9	0.12	156	5.76
六盘山站(山顶)	19.5	2.9	0.20	266	8.48
大湾站(东坡)	6.0	1.3	0.06	155	5.49

此次降水过程在不同区域的分布差异较大,为了比较地形对地面雨滴分布的影响,对山顶、西坡和东坡的雨滴谱数浓度和质量等效直径最大值、平均值和中位值进行计算(如表 3),山顶最先出现降水,降水持续时间最长(36min)、西坡和东坡降水过程持续时间基本相同(20min 左右),而西坡在 16 日 03 时出现 4.9mm/h 的降水强度,东坡主体降水过程开

始阶段平稳增长,降水强度峰值略迟于山顶六盘山站和西坡,山顶数浓度最大,西坡和东坡差异不大,最大等效直径远远大于山顶和西坡,虽然东坡累计降水量远远低于其他两站,但有效直径的平均值和中位值与其他两站差异不大,且大于六盘山站,说明随着海拔高度的增加,雨滴谱的数浓度增加、等效直径减小。

表 3 2021 年 6 月 13 日 20 时至 6 月 17 日 20 时降水过程各个站点海拔高度以及 N_{T} 、 D_{m} 的最大值、平均值和中位值

站点	海拔高度/m	$N_{\text{T}}/\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$			D_{m}/mm		
		最大值	平均值	中位值	最大值	平均值	中位值
隆德站(西坡)	2151	204.81	6.12	0	2.81	0.69	0.61
六盘山站(山顶)	2845.2	395.75	8.83	0	2.04	0.56	0.51
大湾站(东坡)	1981	198.79	6.14	0	10.52	0.60	0.55

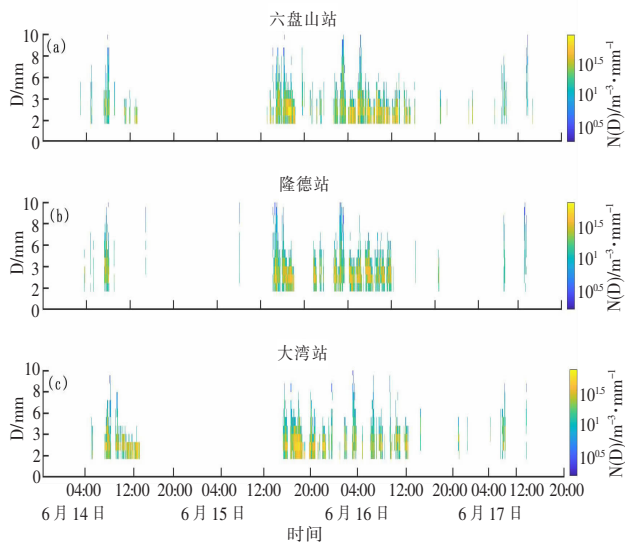


图3 六盘山山顶和东西两侧雨滴谱时间序列变化图

从图3不同站点雨滴谱分布和等效直径 D_m 、粒子数浓度 N_T 的时序图(略),可以看出山顶随着降水主体部分开始作用后,小雨滴($<3\text{mm}$, 等效直径 $<1\text{mm}$)的浓度显著增加,因此表现为 N_T 较大时,对应的 D_m 并不高;西坡主降水时段当雨强增大时,雨滴的 N_T 、 D_m 变化趋势与降水强度变化趋势不一致,表明在主降水时段雨滴谱的谱型发生变化(6月15日20时至16日04时),雨强最强的时间段为16日03时,中雨滴($2\sim 10\text{mm}$, 等效直径 $1\sim 2\text{mm}$)等效直径增大,数浓度也相应地增加,表现为出现阵性降水,此次天气过程自西南向东北移动,西坡雨滴谱型与其他两者站点有着明显区别,由于有水汽的输入,数浓度增加,加之碰并作用滴谱粒径增大,出现阵性降水;东坡的雨强、 N_T 、 D_m 变化趋势较为一致,表明在低海拔处降水强度增加时,雨滴谱的谱型未发生变化,是在原有滴谱基础上随着浓度增加发生了扩展。

3 结论与讨论

利用2021年6月12日至17日期间六盘山区1部X波段双偏振雷达、3部ka波段云雷达、3部Parsivel2雨滴谱仪的观测资料,从天气背景、降水云系演变过程、雨滴谱分布等方面初探降水成因和降水云系演变特征和雨滴谱分布,主要结论如下:

(1)此次降水过程主要受高空槽前西南气流、中低层低涡前部东南气流、地面锋面过境共同影响,六盘山区出现降水时间较长、累计降水量较大,降水时空分布不均等特点。

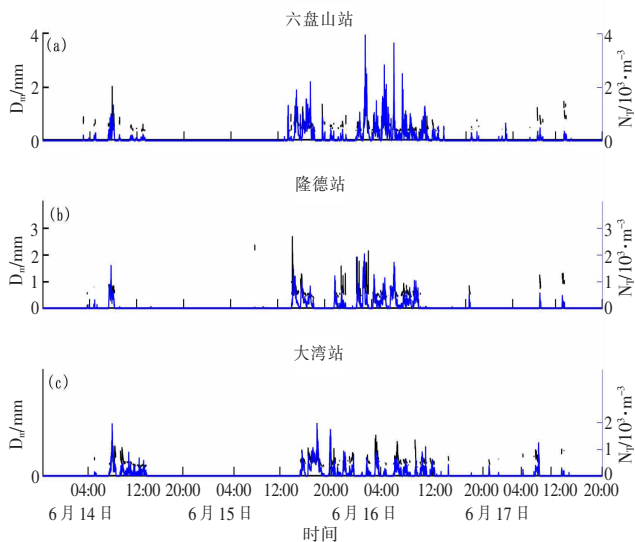


图4 六盘山山顶和东西两侧降水粒子质量等效直径 D_m (黑色实线)、雨滴谱数浓度 N_T (蓝色实线)时间序列变化图

(2)此次降水具有明显的层状云降水特点,回波强度随着降水强度增大而增大,其中,反射率因子在 $20\sim 36\text{dBZ}$ 之间,差分反射率因子在 $0\sim 3.5\text{dB}$ 之间,说明此次降水以小粒子为主,受到阵性降水影响相关系数均值在 $0.5\sim 0.8$ 之间。

(3)此次降水过程三个站点的雨滴等效直径(D_m)较小,雨滴谱数浓度(N_T)随海拔高度增加呈增大趋势, D_m 随海拔高度增加呈减小趋势。

(4)随着降水的时序变化,西坡雨滴谱数浓度(N_T)和等效直径(D_m)并没有很好的对应关系,说明在降水强度发生变化时雨滴谱型发生了变化,这可能是由于水汽输送和粒子碰并等原因引起的,由于云底高度较低或者入云 N_T 在较大时 D_m 较小,东坡 N_T 和 D_m 变化趋势较为一致,表明雨滴谱型未发生变化。

参考文献:

- [1] 洪延超.层状云结构和降水机制研究及人工增雨问题讨论[J].气候与环境研究,2012,17(6):937-950.
- [2] 周积强,黄艳红,桑建人,等.三维风速仪在人工影响天气应用中的问题分析[J].宁夏大学学报(自然科学版),2020,41(4):1-7.
- [3] 樊曙先.层状云微物理结构演变特征的个例研究[J].宁夏大学学报(自然科学版),2000,21(2):179-182.
- [4] 王研峰,王蓉,王聚杰,等.西北干旱半干旱区一次层状云系微物理特征分析[J].干旱区地理,2019,42(6):1291-1300.
- [5] 丁建芳,程博,沙修竹,等.河南省层状云降水雨滴谱特

- 征分析[J].气象与环境科学,2022,45(1):55-64.
- [6] 程鹏,常祎,刘琴,等.祁连山春季一次层状云降水的雨滴谱分布及地形影响特征[J].大气科学,2021,45(6):1232-1248.
- [7] 周非非,廖菲,苏爱芳,等.河南省2002年秋季一次层状云降水过程的观测研究[J].南京气象学院学报,2008,31(4):483-493.
- [8] 田磊,桑建人,姚展予,等.六盘山区夏秋季大气水汽和液态水特征初步分析[J].气象与环境学报,2019,35(6):28-37.
- [9] 曹宁,张立新,桑建人,等.基于微雨雷达的六盘山区地形云降水宏微观特征观测分析[J].气象科学,2019,39(6):775-785.
- [10] 邓佩云,穆建华,舒志亮,等.六盘山区一次降水天气过程分析[J].宁夏工程技术,2021,20(1):23-28.

Analysis of the causes and macrophysical and microphysical in a summer stratiform precipitation over the Liupan Mountain

Dang Zhangli^{1,2}, Ma Simin^{1,2}

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, Yinchuan 750002, China;

2. Ning Xia Weather Modification Center, Yinchuan 750002, China)

Abstract: This paper analyzes the causes of primary stratiform cloud precipitation and the macro and microscopic variation characteristics of precipitation cloud systems in the Liupan Mountain area in summer using observations from a X-band dual-polarization radar, three ka-band cloud radars, and three Parsivel2 raindrop spectrometers. The results show that the temporal and spatial variation of precipitation in Liupan Mountain area is influenced by the frontal transit, with the reflectivity factor of the precipitation cloud system ranging from 20 to 36 dBz and the differential reflectivity factor ranging from 0 to 3.5 dB, and the dual polarimetric radar shows the mean value of the correlation coefficient ranging from 0.5~0.8 due to the influence of the shower. The equivalent diameter of raindrops of this precipitation is small, and the spectrum concentration of raindrop and equivalent diameter show an increasing and decreasing trend respectively with increasing altitude. The concentration of small raindrops is larger because the mountain top is closer to the cloud bottom or within the cloud, and the raindrop spectrum pattern of western slope changes with the occurrence of precipitation, while the spectrum pattern on the eastern slope does not change, which indicates that a stronger shower of precipitation on the western slope due to touching and evaporation of small raindrops, which is consistent with the precipitation manifested in the real situation.

Key words: Liupan Mountain; stratiform cloud precipitation; dual polarization radar; raindrop spectrum