

常倬林,党张利,贾乐,等. 宁夏六盘山区一次人工增雨条件观测分析和效果评估[J]. 气象研究与应用,2022,43(3):26–30.

Chang Zhuolin,Dang Zhangli,Jia Le,et al. Observation analysis and effect evaluation of an artificial precipitation enhancement condition in Liupan Mountains, Ningxia[J]. Journal of Meteorological Research and Application,2022,43(3):26–30.

宁夏六盘山区一次人工增雨条件 观测分析和效果评估

常倬林^{1,2}, 党张利^{1,2}, 贾 乐^{1,2}, 曹 宁^{1,2}, 邓佩云^{1,2}, 周 楠^{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. 中国气象科学研究院中国气象局云雾物理重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 利用云雷达以及微雨雷达等观测资料,对六盘山区一次降水过程的增雨条件及作业效果进行分析。结果表明,此次降水属于层积混合降水;六盘山东坡最大雷达反射率因子最大,其次是西坡,山顶最弱;东坡水凝物粒子下落末速度最大,其次是山顶,西坡最小;降水前云液态含水量以及大气水汽含量出现显著跃增,六盘山东西两侧气流均为上升运动,降水结束后水平风速加强,云系生消在降水前、中、后期出现多层、单层、多层的结构特征。对此次降水过程所开展的地面火箭增雨评估后发现,该区域历史回归分析得到的绝对增雨量为 4.2mm,相对增雨率为 75.3%。

关键词: 六盘山;微波辐射计;云雷达;微雨雷达;人工增雨

中图分类号: P412.13

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.3.05

引言

西北地区东部位于我国内陆,由于降水稀少,蒸发较强烈,所以水资源短缺,生态环境相对脆弱^[1]。六盘山是一条近似南北走向的山脉,六盘山区位于宁夏南部,是宁夏最主要的多雨中心,年降水量可以达到 600mm 以上^[2-3],在六盘山地区开展人工增雨作业以及多种仪器综合观测分析,有利于进一步掌握增雨作业效果和降水特征,为开发六盘山区云水资源,解决西北地区东部水资源短缺问题提供重要依据^[4-6]。在降水过程观测分析方面,很多学者通过特种观测设备或探空数据、再分析资料等数据资料进行了详细的分析,得到降水过程中各种特征参量的变化或降水产生的成因^[7-10]。李强等^[11]利用区域自动站资料、再分析资料、多普勒雷达资料以及 FY-2G 静止卫星逐小时红外亮温资料,对六盘山地区的

一次暴雨过程进行了详细的诊断分析。白婷、田万顺等^[12-13]利用再分析资料、卫星、雷达及飞机等探测资料,对河南一次降水过程中的人工增雨作业条件进行了综合分析。李宝东等^[14]利用飞机探测资料与卫星、雷达以及探空等资料结合分析,对一次层状云增雪作业的技术指标进行探讨,并给出了微物理参量以及卫星、雷达等资料在人工影响天气作业中的应用。杨云芸等^[15]利用风云卫星观测资料和再分析资料对主汛期湖南一次强降雨过程进行分析和降水成因的探讨。本文针对一次降水天气过程,利用微波辐射计、三维风速仪、云雷达以及微雨雷达等特种观测设备的数据资料进行综合分析,对该降水情况下的水汽场、动力场和微物理场特征进行探究,同时对人工地面火箭增雨作业的增雨效率进行评估,有利于了解降水情况,更有效率地开展人工增雨,缓解干旱。

收稿日期: 2022-05-28

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0104)、宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BEG02010)、宁夏青年拔尖人才培养基金项目(RQ0023)和中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J043)

作者简介: 常倬林 (1981—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事大气物理与大气环境及人工影响天气研究。E-mail: changzhl05@126.com

1 资料与方法

1.1 数据资料

使用的资料为 2021 年 7 月 25—28 日 500hPa 天气图、500hPa 及 700hPa 高度场和风场、海平面气压场、500hPa 相对湿度场资料, 六盘山西侧隆德站和东侧泾源站微波辐射计资料, 六盘山 8 个梯度站三维超声风速风向仪观测资料, 六盘山顶及东西两侧 3 部云雷达和微雨雷达观测资料。

其中六盘山西侧隆德站微波辐射计使用的是德国 RPG-HATPRO-G4 型多通道微波辐射计, 采用并行 42 通道设计, 六盘山东侧泾源站微波辐射计使用的是中国电子科技集团公司第二十二所 QFW-6000 型, 可以探测地面至对流层顶的温度、相对湿度、水汽密度廓线、液态水廓线、大气水汽含量和液水路径等。三维超声风速风向仪使用的六盘山大气科学野外试验基地建立的 8 个梯度观测站数据, 可以测量水平和垂直风速与风向。云雷达使用的是西安华腾 HT101 型 Ka 波段测云仪, 可探测 20km 内非降水云、弱降水云、弱降水等气象要素的反射率因子、径向速度、速度谱宽等相关信息。微雨雷达使用的是德国 MRR-2 型雷达, 可以通过测量多普勒光谱的

廓线, 获得雨滴大小分布、下落速度、液态水含量、雷达反射率因子、多普勒速率、路径综合衰减等信息。

1.2 研究方法

在作业效果检验中使用序列分析、区域对比分析、双比分析和区域历史回归分析等统计检验方法。在序列分析中不涉及到对比区, 在区域对比分析、双比分析中和区域历史回归分析中, 在作业区下风方向 8km 范围内为影响区, 对比区选择时主要基于以下几个原则: 一是与影响区为同一天气系统影响, 二是在对比区上风方向且地形地貌相似, 三是两者历史降水量的相关系数在 0.8 以上且通过置信度为 95% 的检验。

四种统计检验方法计算如表 1 所示, R 为相对增雨率, O 为绝对增雨量, 其中序列分析法中 Y_1 和 Y_2 为影响区非作业期和作业期实测降水量, 区域对比分析中 Y_2 和 X_2 为影响区和对比区作业期实测降水量, 双比分析中 Y_2 和 Y_1 为影响区作业期和非作业期实测降水量, X_2 和 X_1 为对比区作业期和非作业期实测降水量, 区域历史回归分析法中 Y_1 和 Y_2 为作业期对比区根据回归方程计算出来的自然降水量的估计值和实测降水量。

表 1 4 种统计检验方法

统计检验方法	相对增雨率	绝对增雨量
序列分析	$R=(\frac{Y_2}{Y_1}-1)\times 100\%$	$O=Y_2-Y_1$
区域对比分析	$R=(\frac{Y_2}{X_2}-1)\times 100\%$	$O=Y_2-X_2$
双比分析	$R=(\frac{Y_2/Y_1}{X_2/X_1}-1)\times 100\%$	$O=Y_2\times (R/(1+R))$
区域历史回归分析	$R=(\frac{Y_2}{Y_1}-1)\times 100\%$	$O=Y_2-Y_1$

2 天气背景分析

2.1 天气实况

7 月 25 日夜间到 28 日白天六盘山区出现连续性降水天气。其中 26 日六盘山区普降小雨, 最大累计雨量为 6.1mm; 27 日六盘山区大部出现雷阵雨或阵雨天气, 西吉县兴隆镇公易村出现短时强降水, 最大小时雨强为 36.4mm (17 时); 28 日仍为对流性降水, 最大累计雨量为 15.7mm。具体降水量分布见图 2。由于六盘山顶及东西两侧布设了微波辐射计、云

雷达、微雨雷达等特种观测仪器, 进一步分析六盘山西侧隆德站、东侧泾源站、山顶六盘山站 25 日 20 时至 28 日 20 时逐小时雨量。可以看出, 六盘山东侧泾源站降水为阵雨, 累计雨量为 1.4mm, 26 日 12—13 时、28 日 19 时三个时次出现降水, 小时雨强均小于 1mm; 六盘山西侧隆德站 26 日为层状云降水, 27 日午后出现雷阵雨, 16 时小时雨强为 10.4mm, 28 日为雷阵雨或阵雨, 累计雨量为 23mm。

2.2 天气形势

7 月 26 日 08 时 500hPa 位于青藏高原东部的

低涡东移影响六盘山区,六盘山区转受槽前西南气流影响,此时六盘山区相对湿度 $>90\%$;700hPa六盘山区仍为偏北气流影响,相对湿度在60%左右,有弱冷空气影响。27日08时500hPa六盘山区受东北冷涡槽后西北气流影响,槽线位于蒙古国东部至内蒙中部到陕西西部一带,上游河西地区有短波槽东移。700hPa受台风外围环流影响,六盘山区为东北气流,上游河西地区有弱切变。CAPE值为392J/kg, K指数 >30 ,有不稳定能量存在,预示午后可能出现强对流天气。28日08时500hPa六盘山区仍受东北冷涡槽后西北气流影响,槽线位于蒙古国东部至内蒙中部到陕西西部一带,槽线位置和27日08时相比略有偏西。700hPa为西南气流,六盘山区受切变线影响。到20时500hPa、700hPa转为北风并且相对湿度减小到60%以下,降水基本结束。

3 水汽动力及云宏微观特征分析

3.1 水汽场特征分析

从26—28日六盘山东西两侧微波辐射计反演的大气水汽含量(IWV)和云液水路径(LWP)的变化来看,整个过程中六盘山西侧大气水汽含量明显高于六盘山东侧。但是六盘山东侧的云液水路径要高于六盘山西侧。由于发生降水时微波辐射计反演的大气水汽含量与云液态水含量结果不准确,因此只针对无降水时定量反演结果做具体分析,有降水时的反演结果只做趋势分析。可以看出六盘山西侧大气水汽含量大约在25~48mm,云液水路径在0~7mm;六盘山东侧大气水汽含量大约在12~40mm,云液水路径在0~8mm。无降水时整个过程大气水汽含量和液水路径都呈现出微弱的下降趋势,六盘山西侧大气水汽含量大约在25~32mm,云液水路径在0~1mm;六盘山东侧大气水汽含量大约在12~23mm,云液水路径在0~1mm;出现降水时大气水汽含量与液水路径都出现了跃增现象。

3.2 动力场特征

六盘山顶出现降水的主要时段在26日10时—16时,27日15—16时,27日20—28日01时,28日15—18时,26日降水前水平风速为 $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,降水开始后水平风速开始上升到 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,在小时降水超过1mm后,水平风速开始逐渐下降,水平风向由降水前西北风转换为东北风,垂直风速的变化与水平风速变化相近,由降水前 $1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $2.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,在小时降水达到1mm后开始逐渐下降(图1)。27日六

盘山顶风向在降水前为西北风,降水开始后由西北风转为西南风,水平风速变化比较复杂,整体上呈现上升的变化,升中有降,垂直风速在降水开始后首先出现了下沉气流,而后开始变为上升气流。28日降水前东北气流在降水开始后变为西北气流,水平风速和垂直风速呈现出逐渐增加的变化。

东坡降水开始前风向为北风,水平风速 $6.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,垂直风速为 $0.02\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,降水开始后风向调整为稳定的北风,水平风速增强,水平风速 $6.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,垂直风速为 $0.03\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,西坡降水开始前北风和西南风,水平风速稳定,水平风速为 $2.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,垂直风速为 $1.05\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下。降水开始后风向为北风和西南风,水平风速增加,水平风速在 $5.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,垂直风速为 $1.00\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

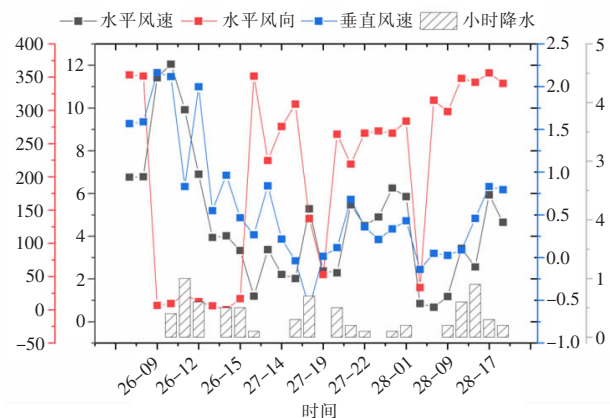


图1 六盘山顶水平风速风向及垂直风速等变化图

3.3 基于云雷达的云宏微观特征分析

7月26日,云系以层状云降水特征为主,各站在4.5km左右有一明显的 0°C 层亮带,云系的生消在降水前、中、后期有多层—单层—多层的结构特征,降水前为云底高为9km,云顶高为13km的高层云,降水期为云顶高在9km左右的深厚的接地云系,降水结束期,为云底高在6km以上的中高层云系,云系减弱消散。回波强度大小表现为六盘山站最强,其次是东坡的泾源和大湾站,西坡的隆德站最弱。降水期间,云体内回波强度均有剧增现象。

7月27—28日,云系的生消特征在降水前、中、后期有多层—单层—多层的结构特征,主降水时段,4.5km左右有一 0°C 层亮带,其中六盘山站最为明显,相较于26日的降水过程,云体内对流性特征更为明显,云体内回波强度的较大值生消变化剧烈,云内粒子湍流运动较强。回波强度大小表现为六盘山站最

强,其次是东坡的泾源及大湾站,西坡的隆德站最弱。

3.4 基于微雨雷达的云宏微观特征分析

7月26—28日,隆德、六盘山及大湾三站出现了融化层亮带,融化层的高度在4000~4500m之间,固态水凝物粒子在4000m左右完全融化后下落速度达到最大值,在融化层以下下落速度几乎不变。

26日07时开始,六盘山顶及东西两侧出现了回波强度大于20dBZ的回波,降水开始;26日13时降水结束,回波为晴空回波,三站回波强度大致相同,六盘山顶融化层高度稍高于其东西两侧的大湾和隆德站。27日六盘山西侧隆德站14:00—16:00出现了对流性降水,隆德站微雨雷达回波强度由晴空回波增加到50dBZ,且强回波接地,其粒子的下落末速度达到 $11\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,该时段是此次过程小时降水最大时段,隆德站14时小时降水达到5.5mm,15时小时降水达到10.4mm,回波强度、下落末速度明显高于六盘山顶及其东侧的大湾。28日,六盘山顶及东西两侧对流云降水特征比较明显。六盘山站的最大雷达反射率因子为47.58dBZ,隆德站为52.64dBZ,大湾站为54.45dBZ,东坡最强,其次是西坡,山顶最弱。六盘山站下落末速度的最大值为 $11.61\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,隆德站为 $11.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,大湾站为 $11.87\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,东坡最大,

其次是山顶,西坡最小。

4 人工增雨作业效果评估

7月28日在隆德关庄进行地面火箭作业,作业时间为15:22—15:23,仰角 45° ,方位为正北方向。根据雷达回波图,可以看出雷达回波移动方向为西北—东南走向。

根据7月28日人影作业情况,结合作业高度风向风速和雷达回波移向移速,将作业点上风方20km以内的区域定为作业影响区,影响区确定好后,根据对比区选择的原则,选取多个不同的备选对比区,计算与其作业影响区的相关系数,以相关系数最大区域,作为最终选取的对比区。影响区内共有雨量站点18个,对比区共有雨量站点9个。

通过以上选取的影响区与对比区,采用序列分析、区域对比分析、双比分析、区域回归试验四种方法分布进行统计检验,以日雨量作为统计变量。从表2中可以看出,区域历史回归分析、序列分析有正效果,显著性水平小于0.05,其他均未通过显著性检验,其中区域历史回归分析绝对增雨量为4.2mm,相对增雨率为75.3%。

表2 统计检验结果

统计检验方法	影响区与对比区相关性 r	绝对增雨量 $\Delta Q/\text{mm}$	相对增雨率 R/%	回归方程	柯氏值	显著性检验 α
序列分析		7.0	263.9			0.01
区域对比分析	0.8042	-0.4	-4.3			0.59
双比分析	0.8042	0.6	5.9			0.32
区域回归试验	0.6852	4.2	75.3	$Y=0.3886+0.6005x$	对比区 0.49 影响区 0.53	0.03

5 结论

(1)降水前微波辐射计云液水路径和大气水汽含水量出现跃增现象,六盘山东西两侧山坡气流均为上升运动,降水开始后,六盘山东坡的气流上升运动加强,西坡气流上升运动略有减弱。降水后东西坡水平风速均加强。降水开始前后,云系的生消呈现在降水前、中、后期有多层、单层、多层的结构特征。

(2)从微雨雷达的观测结果看到本次降水属于层积混合降水,六盘山东坡最大雷达反射率因子最大,其次是西坡,山顶最弱;东坡水凝物粒子下落末

速度最大值是最大,其次是山顶,西坡最小。

(3)对此次天气系统所开展的地面火箭增雨评估后发现,区域历史回归分析得到的绝对增雨量为4.2mm,相对增雨率为75.3%。

参考文献:

[1] 陈豫英,冯建氏,陈楠,等.西北地区东部可利用降水的时空变化特征[J].干旱区地理,2012,35(1):56-66.
[2] 冯建民.宁夏天气预报手册[M].北京:气象出版社,2012:74-77.
[3] 邵建,裴晓蓉,刘娟,等.近53a宁夏暴雨时空分布特征[J].干旱气象,2015,33(4):595-601.

- [4] 常倬林,党张利,孙艳桥,等.基于 FY2G 卫星的宁夏空中云水资源特征研究 [J]. 气象研究与应用,2022,43(1):47-52.
- [5] 邓佩云,桑建人,杨萌,等.近 30 年六盘山东与西坡降水及空中水汽条件差异特征分析[J].气象科技,2021,49(1):77-85.
- [6] 田磊,桑建人,姚展予,等.基于 Ka 波段云雷达的六盘山顶云特征分析[J].气象与环境学报,2021,37(2):84-90.
- [7] 李江南,庞思敏.热带气旋云微物理过程的研究进展[J].气象研究与应用,2021,42(3):1-6.
- [8] 郝巨飞,高俊喜,杨允凌,等.邢台市大气水汽及云水变化的降水前兆分析[J].气象研究与应用,2021,42(1):13-19.
- [9] 田磊,孙艳桥,胡文东,等.银川地区大气水汽、云液态水含量特性的初步分析[J].高原气象,2013,32(6):1774-1779.
- [10] 田磊,桑建人,姚展予,等.六盘山区夏秋季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.
- [11] 李强,纪晓玲,肖艳红,等.宁夏六盘山地区一次局地暴雨天气过程诊断分析[J].宁夏工程技术,2019,18(1):6-11,16.
- [12] 白婷,黄毅梅,樊奇.河南一次降水天气过程人工增雨作业条件综合分析[J].气象,2020,46(12):1633-1640.
- [13] 田万顺,刘艳华.河南 3 次降水过程的人工增雨条件分析[J].气象与环境科学,2011,34(1):5-13.
- [14] 李宝东,孙玉稳,孙霞,等.河北春季一次飞机人工增雪的综合分析[J].干旱气象,2014,32(5):819-829.
- [15] 杨云芸,刘红武,苏涛,等.湖南一次强降水天气过程分析[J].气象科技,2021,49(3):446-454.

Observation analysis and effect evaluation of an artificial precipitation enhancement condition in Liupan Mountains, Ningxia

Chang Zhuolin^{1,2}, Dang Zhangli^{1,2}, Jia Le^{1,2}, Cao Ning^{1,2}, Deng Peiyun^{1,2}, Zhou Nan^{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. Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Using the data obtained by cloud radar and light rain radar et al., the precipitation enhancement conditions and the operation effects of cloud seeding of a precipitation process in Liupan Mountains from July 26 to 28, 2021 were analyzed. The results show that this precipitation belongs to stratified mixed precipitation. The maximum radar reflectivity factor is the largest on the eastern slope of Liupan, followed by the western slope, and the peak of the mountain is the weakest. The maximum value of the final falling velocity of hydrometeor particles on the east slope is the largest, followed by the top of the mountain, and the western slope is the smallest. Before the precipitation, the cloud liquid water content and the atmospheric water vapor content increased significantly. There were updrafts on the east and west sides of the mountain. After the precipitation, the horizontal wind speed strengthened. Besides, the formation and disappearance of cloud system appeared multi-layer, single-layer and multi-layered structural features before, during and after precipitation, respectively. After evaluating the ground rocket rainfall increase carried out by this rainfall process, it was found that the absolute rainfall increase obtained by the regional historical regression analysis was 4.2mm, and the relative increase rate of rainfall was 75.3%.

Key words: Liupan Mountain, microwave radiometer, cloud radar, micro rain radar, cloud seeding