

六盘山地形云人工增雨技术试验设计

濮江平^{1,3} 桑建人² 舒志亮² 田磊² 穆建华² 周积强² 黄湛恺³ 杨志莲⁴
翟显明⁴ 李向栋⁴ 孔晨晨⁵ 李进玉⁵ 范晓华⁶ 李化泉⁶ 高国清⁷ 石云林⁸

(1 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081; 2 宁夏回族自治区气象局灾害防御中心, 银川 750002;
3 云水工程南京有限公司, 南京 210009; 4 固原市气象局, 固原 756000; 5 泾源县气象局, 泾源 756300;
6 隆德县气象局, 隆德 756400; 7 六盘山气象站, 隆德 756400; 8 南京五方美拓气象环境研究院, 南京 210009)

摘要: 六盘山脉地处青藏高原东部延伸地带, 连接秦岭, 南北逶迤200 km, 分水岭平均海拔2500 m, 最高主峰海拔2942 m。六盘山南部重叠的峡谷是泾河的主要发源地, 另外还有两条河流均发源于此。六盘山山脉形成的“南北走向山墙”对于不同类型的天气过程而变得复杂, 特别是地形云形成过程中水汽场、气流场受山脉地形的影响形成了独特的地形云特征。为此, 在西北人工影响天气能力建设工程中增加研究试验项目, 开展地形云自然降水研究和人工增雨试验。在地面人工增雨作业能力、人影作业指挥系统、云物理试验基地等方面开展试验, 提供或验证工程设计, 解决各项建设任务在实施和运行中存在的技术难点和有关问题, 实现工程所建各项设备设施的科学应用, 发挥工程建设的最佳效益。介绍了六盘山地形云人工增雨技术试验情况, 包括外场试验设计、试验方案、试验过程和初步的试验结果。试验结果获得了六盘山地形云分类和强对流发展规律, 能够为中部、东南、西南等区域人工影响天气能力建设工程提供站点位置设计、调整提供技术依据。

关键词: 地形云, 降水模型, 人工增雨, 外场试验, 六盘山

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.019

Rain Enhancement Experiment Plan for Orographic Cloud Seeding in Liupan Mountains

Pu Jiangping^{1,3}, Sang Jianren², Shu Zhiliang², Tian Lei², Mu Jianhua², Zhou Jiqiang²,
Huang Chenkai³, Yang Zhilian⁴, Zhai Yuming⁴, Li Xiangdong⁴, Kong Chenchen⁵,
Li Jinyu⁵, Fan Xiaohua⁶, Li Huaquan⁶, Gao Guoqing⁷, Shi Yunlin⁸

(1 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Ningxia Meteorological Disaster Prevention Center, Yinchuan 750002

3 Exploitation of Cloud Water Resources Engineering Limited Company (ECWR), Nanjing 210009

4 Guyuan Meteorological Bureau, Guyuan 756000 5 Jingyuan Meteorological Bureau, Jingyuan 756300

6 Longde Meteorological Bureau, Longde 756400 7 Liupanshan Weather Station, Longde 756400

8 The Panta Essential Meteorology & Environment Academy (PEMA), Nanjing 210009)

Abstract: The Liupan Mountains are located in the eastern extension of the Qinghai-Tibet Plateau, connecting the north and south of Mountain Qinling Ranges at 200 km long, the watershed connection average elevation of 2500 m, the highest main peak elevation of 2942 m. The overlapping canyons in the southern part of the Liupan Mountains are the main origin of the Wei River, and two other rivers originate from there. The north-south gable formed by the Liupan Mountain Range becomes complicated for different types of weather processes, especially the surface water vapor field and air flow field in the process of terrain cloud formation, which form unique orographic cloud characteristics under the influence of mountain terrain. Therefore, in the National Weather Modification Operating Ability Engineering Project in Northwest China (NWMPNW) to set an experiment and test projects, terrain cloud natural precipitation characters and rain enhancement test in the Liupan Mountains. In the ground operation capacity of rain enhancement, operation command system of weather modification, cloud physics test base and other aspects of the test, to provide or verify engineering design, to solve the construction tasks in the implementation and operation of the technical difficulties and related problems, to achieve the scientific application of the equipment and facilities built by NWMPNW, to play the best benefits of engineering construction. This paper introduces the experiment of precipitation enhancement technology of the Liupan Mountains topography cloud. It's included in the experiment design, scheme, process and results that could be for weather modification operating facilities in site design and adjustment. The results of experiment obtained the classification of the Mt.

Liupanshan topographic clouds and the characteristic of deep convective cloud development. It can provide the technical basis for site location design and adjustment for the construction of other projects in middle, southeast and southwest in China.

Keywords: orographic cloud, precipitation model, rain enhancement, in situ experiment, Liupan Mountains

收稿日期: 2020年10月20日; 修回日期: 2020年12月23日

第一作者: 濮江平(1963—), Email: jumpy@126.com

资助信息: 西北区域人工影响天气能力建设研究试验
(ZQC-R18169/RYSY201904)

0 引言

人工增雨是建立在云物理学研究基础之上的应用工程技术。在适当的时机、将适当剂量的催化剂播撒到云中适当部位(即“三适当”原则)是人工增雨的核心要素^[1],也是人工增雨科学作业、精准作业的关键所在。六盘山地形云人工增雨技术研究试验就是要获取这“三适当”相关的天气动力学和云物理学相关的物理因子,在西北地形云研究基础上^[2],采用地面高炮、火箭和焰炉发生器施放人工冰核催化剂,改变地形云云滴-雨滴转化的微物理过程,提高云滴-雨滴的转化效率,增加地形云降水量。

六盘山脉地处青藏高原地区东部延伸地带,南北透迤为200 km,平均海拔为2500 m,主峰米缸山海拔为2942 m。既是关中平原的天然屏障,又是北方重要的分水岭,六盘山南部重叠峡谷是泾河的主要发源地,另外还有清水河、葫芦河等均发源于此。因而,在西北人工影响天气能力建设工程中增加研究试验项目,开展地形云自然降水研究和人工增雨试验,发挥工程建设的最佳效益。

六盘山山脉形成的“南北走向山墙”对于不同类型的天气过程而变得复杂,特别是地形云形成过程中水汽场、气流场受山墙地形的影响形成了不同于祁连山地形云的特征^[3]。2018—2020年开展六盘山地形云生消规律研究,计划用3年的时间完成六盘山地形云自然降水概念模型和六盘山地形云人工增雨概念模型的建立。试验目标是为宁夏六盘山区域人工影响天气能力建设地面作业能力、人影作业指挥系统、试验示范基地提供或验证设计数据、资料,解决各项建设任务在实施和运行中存在的技术难点和有关问题,实现工程所建各项设备设施的科学应用、各项建设任务的有效落实和工程整体效益的切实发挥^[4]。同时,通过开展研究试验总结得到的人工影响天气技术、指标和方法也将对后续其他相关人工影响天气能力建设工程提供有益借鉴,减少后续相关工程建设中重复性问题。

1 试验设计

“西北区域人工影响天气能力建设项目六盘山地形云人工增雨技术研究试验”作为“西北区域人工影响天气能力建设项目”建设的前期研究试验,试验思路和方法不偏离人工影响天气基本知识基本原理,目的是利用当前云物理学认知开展地形云研究^[5-6],指导西北区域人工影响天气能力建设项目,建设的人工影响天气专业探测设备及六盘山试验区现有和未来建设的气象探测设备,开展六盘山核心地区的

地形云研究试验,提高六盘山地形云人工增雨作业的科学技术水平。

试验设计原则是地形云试验研究与人工增雨技术应用相结合^[7],研究试验与西北人影工程建设目标高度一致,试验研究与工程建设紧密结合,同步设计同步实施,研究试验技术方法与技术路线的可行性与先进性并重。试验期间,试验组根据宁夏回族自治区气象局总体布局,在专家组的协助下宁夏人影中心完成了“六盘山地形云试验基地构架规划和项目设计”。依据规划,2020年该项目建设已经初具规模,为打造“国家级地形云试验基地”奠定了技术基础。

结合六盘山地区常规气象观测体系,充分发挥人影影响天气特种观测设备作用,特别是采用地面降水粒子谱观测方法^[8-9],摸清六盘山区云水资源的现状及地形云的分布及其结构特征,提高六盘山区人工增雨实施过程中的关键技术环节的科技含量,制定六盘山地形云人工增雨作业效果评估方法,提高当地气象部门人影作业指挥技术人员的业务水平和业务素质,开展人影科学作业和精准作业。

试验设计体系为:

1) 制定六盘山地区人工影响天气特种观测资料的质量控制方法,在外场综合观测期间开展云水资源分析和云宏微观物理量分析,收集人影特种观测资料,建立观测数据集;分析地形动力抬升及重力波形成与降水分布的规律^[10];结合国家气候中心研究的六盘山地区格点化降水资料,与实际观测降水量对比分析,检验格点化资料。

2) 在云水资源背景方面,分析六盘山区水汽、流场、地形云宏微观等方面的特征;地形对云降水过程起到至关重要作用,寻找六盘山区稳定的水汽来源与水汽通道,水汽输送、气流辐合、各类环流天气系统汇集区。结合人工影响天气数值模式方法^[11],通过外场综合观测试验,研究地形云的形成机制和开发潜力;分析六盘山区地形云形成、发展、消亡的规律,建立六盘山区地形云降水的概念模型。

3) 在地形云人工增雨作业的关键技术方面,给出不同天气条件下不同作业手段的卫星、雷达及人工影响天气特种观测的云宏微观物理量相关的人工增雨作业指标^[12],地形云人工增雨作业技术,作业条件、作业量、作业时机,各类作业装备催化效果的验证,建立六盘山地形云人工增雨作业概念模型,以及概念模型中各特征参量计算的方法,提高六盘山区地形云增雨作业科学性。

4) 在作业效果评估方面,借鉴自然降水变化规律及人工影响天气效果方法^[13],研究六盘山区多年来

开展的人工增雨作业的统计效果检验及物理效果检验的方法,寻找能够佐证地面增雨效果的云的宏微观物理量变化的物理证据。构架六盘山地形云人工催化作业条件探测体系和作业效果检验方案。

2 试验方案

六盘山地区人工增雨的目的主要是生态保护,既要人工增雨,也要开展山地水资源保护利用^[14]。在前期水分子结构理论研究基础上^[15-16]开展人工增雨技术研究。六盘山地形云人工增雨技术研究试验的设计主要针对六盘山地形云开展背景研究和人工增雨试验,在项目专家组指导下联合宁夏回族自治区人工影响天气中心(以下简称宁夏人影中心)和固原市泾源县、隆德县气象局完成六盘山地区天气背景分析、六盘山地形云综合观测试验和六盘山地形云人工增雨作业技

术试验任务,计划收集不少于8个降水过程的外场综合观测数据集,分析研究降水过程规律、人工增雨作业指标和物理响应,建立六盘山地区降水概念模型和人工增雨概念模型,修订人工增雨作业指标,制定人工增雨作业效果评估方案。

2.1 试验设计与试验内容

六盘山试验区包含固原市的泾源、隆德、西吉、彭阳等县地域,核心试验区以六盘山气象站、隆德县气象局、泾源县气象局和泾源县大湾作业点范围内的,主要是东西横穿六盘山脉的梯度观测站网(图1)。其中固原市天气雷达位于六盘山顶2840 m海拔高度的六盘山气象站,2020年中国气象科学研究院新购置的X波段双偏振雷达安装在彭阳县孟原乡,2021年计划再购置一部X波段双偏振雷达建于西吉县

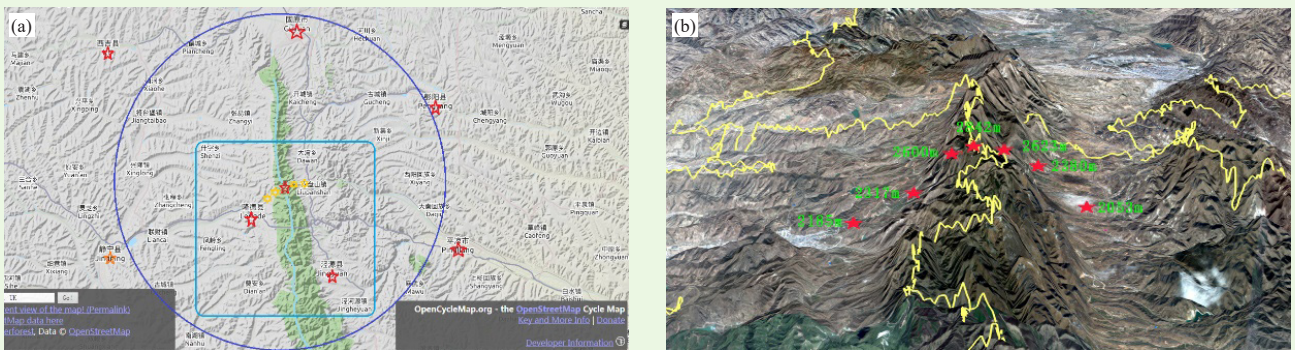


图1 六盘山核心试验区(a)和梯度观测站高度(b)分布

Fig. 1 Distribution of height (a) and gradient station height (b) at Liupan Mountains core test area

境内,距离六盘山气象站约90 km。

总体设计分为三大类别、六个分项和16个子项目,研究内容分解到宁夏人影中心、固原市气象局公服中心、泾源县气象局、隆德县气象局和六盘山气象站(表1)。

2.2 观测设备和人影装备

六盘山试验区包含常规和人影专用探测设备,布设主要集中在四个综合观测站、两个雷达站和一个探空站(表2)。另外还有区域加密自动气象站301个,其中六盘山西侧147个,东侧154个,自动站间平均距离为7~8 km。宁夏回族自治区支持六盘山生态环境改善项目购置了数十套地面自动站进行补充。

观测仪器的布设按照地形云研究的常规分布,在六盘山西侧梯度站和隆德县气象局观测场、六盘山东侧梯度站、泾源县气象局观测场、大湾作业炮点和六盘山山顶气象站等3个超级站和7个梯度站,初步分析了其中的微雨雷达数据^[17]。观测站分布参见图2a。

在隆德县气象局新观测场、大湾作业点、六盘山气象站观测场建设了3个超级云物理观测站,每个测

表1 研究试验相关内容

Table 1 Research and experiment contents

类别	分项	子项目
A 六盘山地区天气背景分析	I 试验区复杂地形精细化雨量场分析	1) 试验区降水量场的观测试验及气候分布特征
		2) 利用降水现象仪数据分析降水雨滴谱特征
	II 试验区复杂地形气流场分析	3) 利用雷达资料定量估测降水量
B 六盘山综合观测试验	III 六盘山地形云水汽和云水的观测和分析	4) 试验区气流场的气候学特征分析
		5) 试验区三维气流场分析
	IV 六盘山地形云物理特征综合观测试验	6) 试验区水汽综合观测研究
		7) 试验区云场特征分析
C 六盘山地形云人工增雨作业技术验证试验	V 地形云作业指标验证和增雨作业概念模型	8) 不同天气背景下地形作用、水汽来源及地形云降水效率研究
		9) 地形云云物理综合对比观测及催化试验
		10) 建立六盘山地形云降水概念模型
	VI 地形云人工催化作业效果检验方案设计	11) 地形云增雨(雪)作业条件综合监测试验
		12) 地形云人工增雨作业技术指标验证试验
		13) 地形云人工增雨作业概念模型研究
		14) 地形云人工增雨催化物理响应分析
		15) 地形云人工增雨物理统计检验
		16) 地形云人工增雨数理统计检验

站都配备有Ka波段测云仪、微雨雷达、微波辐射计、激光云高仪等云物理专用垂直遥感探测装备和雨滴谱

表2 研究试验的特种观测探测设备
Table 2 Cloud observation equipment

序号	设备名称	单位	数量	安装地点
1	C波段多普勒天气雷达	部	1	六盘山站
2	MWR微波辐射计	部	3	大湾隆德六盘山站
3	MRR微雨雷达	部	3	大湾隆德六盘山站
4	Ka波段测云仪	部	3	大湾隆德六盘山站
5	激光降水粒子谱仪	部	9	大湾隆德六盘山站
6	GNSS/GPS/MET	个	8	泾源隆德六盘山站
7	闪电定位仪	部	1	六盘山站
8	超声三维气流仪	台	7	泾源隆德六盘山站
9	无线电探空站	个	1	甘肃平凉市
10	X波段双偏振雷达	部	1	彭阳县孟原
11	红外激光云高仪	台	3	大湾泾源隆德
12	DMT雾滴谱仪	台	1	六盘山站

仪。为的是比较六盘山西侧、东侧和六盘山顶的系统性云的微物理结构分析。六盘山气象雷达2019年改造为C波段双偏振多普勒雷达，为地形云人工增雨作业条件识别提供了大范围扫描信息。中国气象科学研究院提供了4台激光云高仪布设在各个超级云物理探测站，另外工程项目办支援六盘山试验的1部X波段双偏振多普勒天气雷达安装在孟原，距离六盘山雷达站约98 km，加上宁夏回族自治区支持六盘山生态环境改善项目支持六盘山试验区的X波段双偏振多普勒天气雷达，能够解决六盘山天气雷达站自身“灯下黑”的探测难题。

六盘山地区人工影响天气作业体系隶属于固原市气象局人工影响天气中心，包括泾源、隆德县地面作业点，涉及六盘山核心试验区作业点有11个，分布在六盘山西侧的隆德县的城关、观庄、陈靳、大庄、莫安、好水6个点，六盘山东麓的泾源县的大湾、什字、惠台、黄花、兴盛5个点，总共火箭发射架27部。另有12部地面焰炉布设在隆德县的城关、大庄、陈靳和泾源县的大湾、什字、惠台等作业点，六盘山顶气象站还有一部未曾使用过的焰炉。各仪器作业设备分布参见图2。固原市人影状况分析参见文献^[18]。

2.3 观测方案设计

自然云降水过程观测主要依赖天气雷达和特种雷达。固原市六盘山顶C波段多普勒天气雷达观测方案是中国气象局规定的VCP21体扫观测模式，无法更改也不允许随意变动为RHI扫描体制，为此，试验组专门定制的X波段多普勒双偏振雷达设计了观测方案，主要体现在六盘山方位上的RHI扫描观测模式。每天定时开机观测：每天08时开始到20时为止，每小时

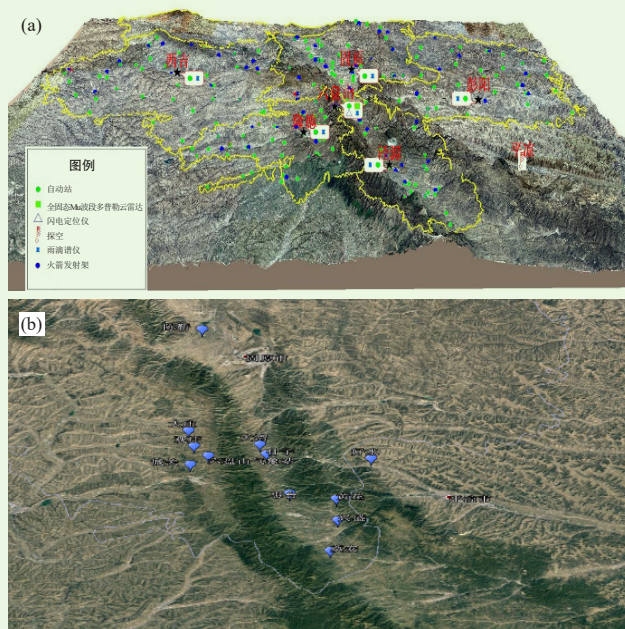


图2 (a) 综合观测站(白色方块)、区域自动站(绿圆点)和11个火箭作业点(蓝圆点)分布; (b) 12部地面焰炉作业点(蓝色心形)

Fig. 2 Distribution map of Integrated observation stations (the white square), automatic surface observations (green dot), 11 rocket sites(blue dot) (a), 12 operation points of ground seeding generators (b)

整点和半点时刻，对六盘山雷达方位和相反正南方向进行两个方位的RHI垂直体扫，完成后进行规定16个角度模式的体扫，然后停机休息。如果发现较强的对流云，应对强对流中心位置各偏离±3°方位角进行RHI垂直体扫。根据天气状况和试验指挥部指令临时开机加密观测。

激光降水粒子谱仪、三维超声波气流仪、Ka波段测云仪、多通道微波辐射计WMR、连续波微雨雷达MRR、激光云高仪、雾滴谱仪和地面多要素地面自动气象站等全自动测量仪器要求24 h连续观测。为保障试验区所有使用特种专用技术装备的有效运行，建立定期标定检定制度。每年外场试验开始、结束均应标定检定一次，微波辐射计每三个月标定一次，标定检定由设备生产厂家负责完成并提交标定检定报告和探测数据质量控制报告。试验期间常驻六盘山试验区技术人员，每天将观测到的数据进行初级分析绘图进行对比，发现数据异常及时巡检观测仪器。

GPS/GNSS/Met掩星观测系统水汽反演需要特殊方法实现大气整层水汽浓度及水平分布，平凉无线电探空资料每天定时传输到试验组，供飞机人工增雨作业条件判定依据。地形云宏观观测方案主要建议隆德泾源和六盘山气象站恢复地面人工云能天的观测

记录, 培训开展手机视频拍摄记录地形云宏观演变状况。

2.4 试验进度报告制度

外场试验整体进度控制包括在项目生命周期中协调所有其他项目管理领域所涉及的过程。它确保项目所有的组成要素在正确的时间结合在一起, 以成功地完成项目。项目整体管理主要包括项目计划的制定、项目计划执行、整体变更控制以及首席科学家对项目的支持。外场试验项目组定期(每个月25日)向六盘山项目办提交“工作进展报告”, 每月底前由六盘山项目办汇总“工作进展报告”提交给西北区域项目管理办公室。

2.5 培训机制及学术交流

六盘山试验组建立了培训机制, 邀请人工影响天气行业专家对试验区内各单位和有关试验人员开展多种形式的观测技术培训, 也邀请了各种设备生产厂家技术人员开展设备保障维护和数据结构及应用技术培训。东北人影工程效果检验培训班免费为宁夏人影技术培训。外场试验期间首席科学家负责现场技术培训, 取得了很好的示范效果。

试验启动前期系统性培训了固原市气象局、隆德县气象局、泾源县气象局和六盘山气象站基层气象观测员和预报员, 充分了解了地形云的概念特点及科学问题, 以及云物理特种观测设备的数据处理方法。利用各个台站的老观测员技术储备, 要求各台站恢复人工观测云能天观测, 制定了观测规范和观测记录簿; 试验期间在外场驻地培训宁夏人影中心参与外场试验的技术人员, 使参试技术人员充分了解各种人影特种观测仪器的原理以及云物理特种观测设备的数据处理方法。指导学术技术论文选题方向和写作方法, 提高观测数据的分析水平; 试验后期指导中国气象局人工影响天气中心青年科学家参与外场试验并适时讲解亲身体验的天气过程地形云影响相关性, 从理论分析到实际数据分析能力有了大幅度提升。各方面普遍反映参与外场试验过程效果很好。

3 试验过程

2019年7月18日, 在宁夏人影中心进行了“六盘山地形云人工增雨技术研究试验项目推进会”。随后, 宁夏人影中心和云水工程南京有限公司全部参试人员进入六盘山气象站开展六盘山试验区仪器检查调校标定, 标志着六盘山地形云人工增雨技术研究试验项目外场试验正式实施。

宁夏人影中心技术人员分为5个小组轮流进驻六盘山外场试验基地, 驻场观测维护云物理特种观测仪

器, 适时分析观测数据。2019年外场试验期间共获得了8个比较完成的降水过程配套资料, 主要以系统性降水为主, 仅有一个对流行降水个例, 单纯地形云降水个例没有遇到, 为此计划在2020年外场试验集中针对地形相关人影降水个例的获取, 数据分析有待进一步系统性综合分析。

试验组在六盘山外场试验基地开展自然降水过程综合观测试验, 直到10月底大雪封山之前试验人员全部撤场。

配合宁夏人影中心试验工作计划, 2020年6月9日云水工程公司派出专车赴宁夏六盘山外场试验区开展2020年度外场试验。

由于第二年度试验主要目标是结合人影作业开展作业前后地形云相关降水过程的云物理学结构变化探测, 云水工程公司协助宁夏人影中心考察选点并确定在彭阳县孟原乡安装X波段双偏振雷达, 为2020年人工增雨试验奠定了很好的对流云垂直精细结构探测的基础。

4 试验成果

4.1 初步结论

根据2019年六盘山地形云外场试验获取数据分析初步得到地形对降水影响的结论:

1) 从地面降水量分布的观测发现, 六盘山脉东侧降水量无论季节性降水量还是年度降水量都要比西侧的降水量要大。采用雨滴谱分析方法^[19], 天气动力学分析, 可能的原因是六盘山脉地形能够有限阻挡深厚西风槽系统底部移动速率, 延缓降水在六盘山地区的停留, 同时六盘山脉南部双山脉结构使得六盘山东侧降水持续性加强, 造成单次系统性降水累积量的显著差异。分析结果与前人研究结果一致^[20-21]。

2) 对于近地面大气底层西来强风且六盘山脉分水岭处于云内(云底高度低于分水岭), 六盘山强迫地形抬升造成云系的加强, 形成含水量较大地形云, 此类地形云易于产生降水, 适合于采用地面碘化银发生器人工增雨作业(冬季更适合人工增雪作业), 建议迁移地面焰炉到六盘山西坡合适位置可以验证增雪效果。

对于近地面大气底层西来弱上升气流且六盘山脉分水岭处于云内(云底高度低于分水岭), 六盘山强迫地形抬升并不能加强地形云发展。相反还会诱发东坡产生上升气流, 在六盘山东坡形成地形云, 且东坡地形云滴浓度显著大于西坡云滴浓度, 使得东坡地形云更易于产生降水条件。在六盘山东坡合适位置安装地面碘化银发生器能够产生人工增雨之效果。但六盘山东、西坡均没有安装地面焰炉。

3) 弱的高空小槽天气降水过程属于浅薄系统,

六盘山脉地形几乎对此类降水系统没有显著影响。如果云底高度大于六盘山脉以上，六盘山东侧云底更低小雨淅沥而西侧降水稀稀拉拉，地面能见度却较好，山脉两侧降水量的分布相差无几。

4) 夏季太阳辐射强烈的晴空，从上午开始六盘山脉分水岭经常性产生弱对流泡排列成淡积云墙，午后对流加强局地形成浓积云甚至积雨云。在突起的山峰上经常性有强对流性云环绕（雷达图上强回波亮点），一旦强对流云离开山峰向东移动便是雷暴云的主体，在向东偏南移动的过程中吸收地表太阳辐射不稳定能量进一步加强对流成为冰雹云，此类对流行天气系统适合于地面火箭高炮人工防雹增雨作业，人工增雨做适量播撒，人工防雹作过量播撒。

5) 由于六盘山地形云试验区上方是西北航空大航路，白天申请空域几乎没有可能被批准，加之六盘山南部天水机场经常训练飞行北部固原机场下滑道限制等因素，使得该地区不适合做火箭高炮人工增雨防雹试验，仅适合于地面碘化银发生器做人工增雨作业试验。但由于六盘山林业管理生态保护限制林区作业点设置，需要气象部门与林业管理部门协调才能进行冬季人工增雪试验。

6) 六盘山夏季山顶小对流团生消规律的认识。北半球夏季太阳辐射强烈，西北黄土高原大范围地区地表特性较为均一，太阳加热地表难以直接诱发局地对流泡。但在午后地面气温急剧上升，大气密度降低，高层大气冷平流导致大气蓄积了大量的不稳定能量，六盘山地区的山脉地形为促发局地对流提供了动力条件。常见的一种宏观现象是独立的山头上午后缭绕着云团久久不离山头，且对流特性越来越强。表现在雷达探测图上就是沿着六盘山南北走向的山脉上的山峰位置始终存在一些强回波亮点，回波强度有时高达40~50 dBz但却很少移动，六盘山雷达站宏观观测也能发现此类现象。根据形成的强风暴对流单体反向追踪发现：强风暴的发源地都是这些孤立山峰上的对流云团。由此可以推断，夏季在六盘山山脉山峰午后形成的对流云依附于地形存在，当对流不稳定能量达到一定强度后，强对流单体离开山峰向下游方向移动并继续吸收大气不稳定能量而加强为冰雹云。

4.2 降水概念模型

根据外场试验结果，初步归纳六盘山地形云自然降水概念模型，大致可分为以下4类。

1) 六盘山西风槽冷锋降水模型

大尺度天气北京以西来锋面与南来水汽输送系统性降水为主的动力配置，六盘山地形对于锋面移速有

一定的阻挡作用但不显著，但锋面翻山遇到的强迫抬升增强的垂直气流，更容易在山北面形成较强降水，使得六盘山东侧的总降水量大于西侧，而且六盘山南部、中间都有两道山峰阻挡形成的山窝二次抬升。六盘山泾河主源有两个凹陷地形流域，猜测山窝中的降水量大于东西两侧，也可能是持续性降水机制。该模型典型过程的动力配置和降水分布参见图3。由于此类降水尺度很大，地形仅仅会短时阻碍天气系统移动速率，但在六盘山第二道山脉前又会延长停留时间造成降水分配上的宏观差异。泾源县各条河流的流域性水文特征有待水文数据考证。

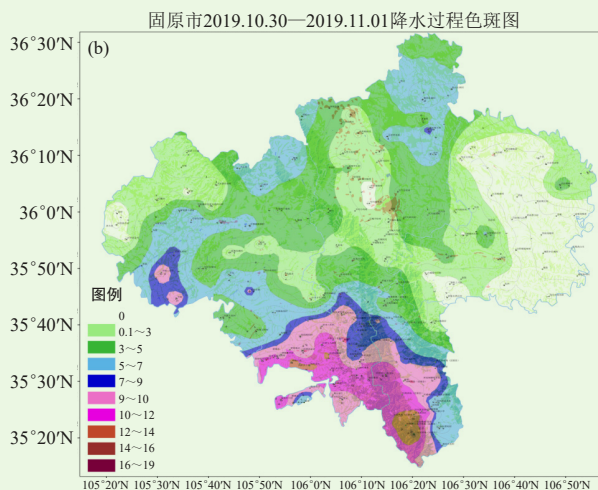


图3 六盘山西风槽冷锋降水模型(a)及典型过程的降水分布(b)
Fig. 3 Precipitation model for normal cold-front of westerly trough (a) and it's precipitation distribution (a) of in Liupan Mountains area

2) 六盘山西向东急行气流地形云模型

近地面偏西暖湿气流遇六盘山抬升成云一翻山后下沉一云雾消散（西风云起东侧晴空），这是六盘山经常遇见的地形云雾的动力配置。但该类地形云

移速较快不宜形成有效降水，西侧山坡针叶林植被表面湿润而土壤墒情较差也是这类降水的特征之一（图4）。冬季地面催化剂播撒器人工增雪作业应该能够产生较好的作业效果。建议固原市气象局调整作业点到六盘山西坡强上升气流区。

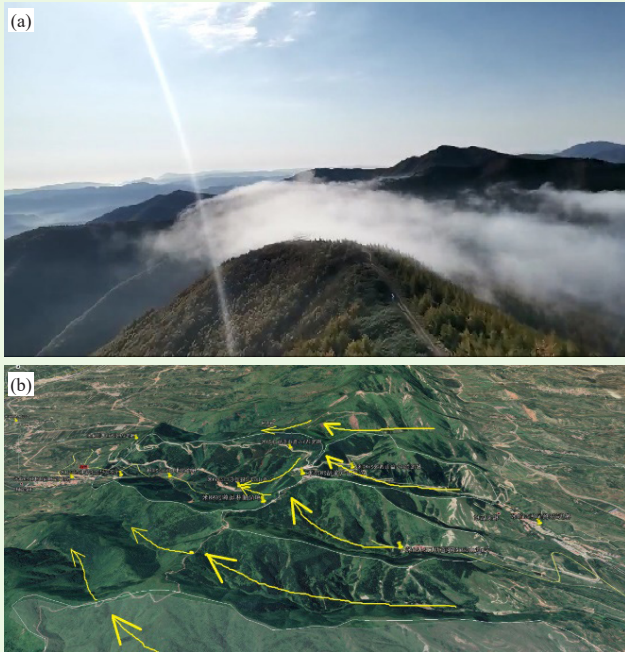


图4 六盘山西向东急行气流地形云 (a) 和气流 (b) 示意图
Fig. 4 Precipitation model of west to east turbulence terrain cloud (a) and airflow (b) in Liupan Mountains

3) 六盘山东向西缓慢地形云模型

东侧近地面暖湿弱气流遇六盘山抬升对流云起（与第2类动力场类似，但气流强度明显偏弱，形成稳定垂直对流），但形成的云雾被西侧较强气流吹散返回形成对流环流；或西风+东风形成对头风垂直抬升，此类动力场能够形成有效降水，近地层也容易形成雾，造成六盘山东坡土壤湿润墒情较好，植被的阔叶林较多（图5）。

4) 六盘山谷地云雾降水模型

在高空槽形势下六盘山地形对高层云系影响较弱，降水量东西侧差异不显著但东侧更容易形成低云接地成雾；近地层西风气流翻六盘山下沉，在东侧六盘山谷地遇暖气团容易形成雾；整体大气近地面静稳，六盘山东侧地面暖湿，在西来冷空气作用下暖湿上层更容易形成逆温，整层气温降低后形成雾。造成六盘山东侧泾源县湿度环境明显高于西侧地区，雾日显著多于六盘山西侧隆德县，土壤墒情普遍较好，山区植被以阔叶林居多（图6）。

致谢：本项试验由云水工程南京有限公司和宁夏回族自治区气象局灾害防御中心共同组织实施，得

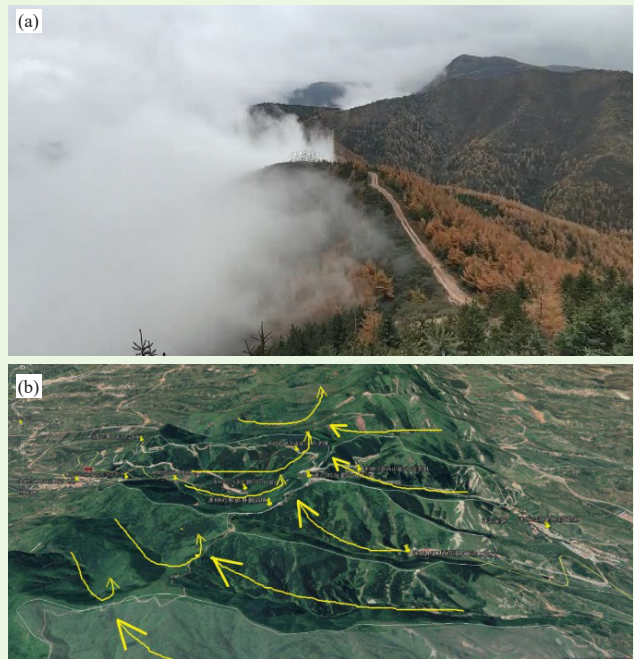


图5 六盘山东向西缓慢地形云 (a) 和气流 (b) 示意图
Fig. 5 Precipitation model of east to west slow flow terrain cloud (a) and airflow (b) in Liupan Mountains

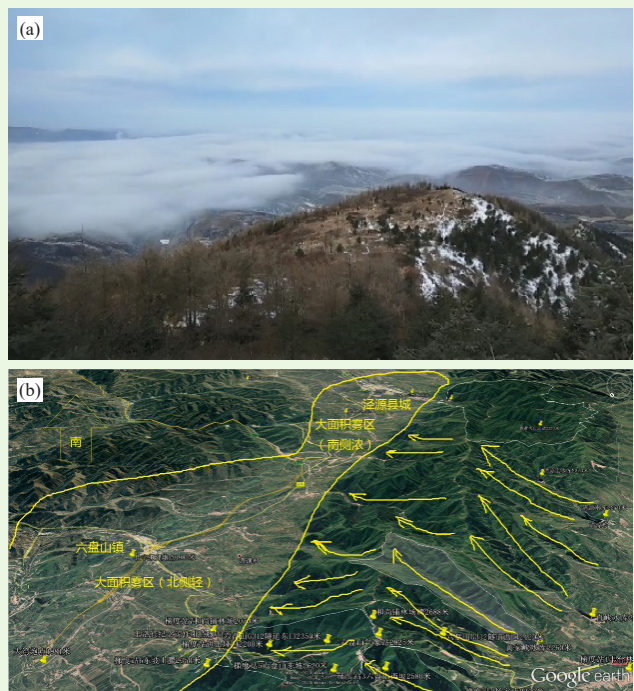


图6 六盘山东侧谷地云雾 (a) 和降水流域 (b) 示意图
Fig. 6 Cloud/fog (a) and precipitation model (b) at the eastern valley of Liupan Mountains

到固原市气象局及各县气象局及人影作业点的大力支持，在此向各参试单位表示感谢！

在本试验方案设计和试验过程中许焕斌、毛节泰、张培昌、董希泉、袁百克、邓毅、许小峰、王守荣、张蕾、段

(下转148页)

$\theta=0.4153$ 。随后对“左截断”现象出现原因进行了分析,发现主要为凹坑重叠、数据读取造成的误差。

地面降雹信息对于冰雹云微物理结构研究及雷达识别冰雹云的验证具有重要意义,测雹板观测能客观反映地面降雹概况,虽然其制作及数据获取需一定的人力去完成,但由于易制作、成本低廉可广泛使用,进而提高防雹减灾能力。

后续将会更加深入的对巴彦淖尔降雹天气进行研究,为该地区防雹减灾提供科学依据,为人工防雹工程建设贡献一份力量。

参考文献

- [1] 白婷婷. 巴彦淖尔市农业技术推广现状及发展对策研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [2] 郭玉凤, 刘继东, 方晓红. 巴彦淖尔市冰雹天气. 北京: 科学普及出版社, 2011.
- [3] Schleusener R A, Jennings P C. An energy method for relative estimates of hail intensity. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1960, 41(7).
- [4] Cifelli R, Doesken N, Kennedy P, et al. The community collaborative rain, hail, and snow network: informal education for scientists and citizens. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86(8): 1069-1077.
- [5] Seino H. On the characteristics of hail size distribution related to crop damage. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1980, 36(2): 81-88.
- [6] Manzato A. Hail in northeast Italy: climatology and bivariate analysis with the sounding-derived indices. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, 51(3): 449-467.
- [7] Dessens J, Berthet C, Sanchez J L. Change in hailstone size distributions with an increase in the melting level height. *Atmospheric research*, 2015, (158-159): 245-253.
- [8] 周兰, 岳耀杰, 栗健, 等. 冰雹灾害承灾个体脆弱性评估研究进展. *中国农业气象*, 2014, 35(3): 330-337.
- [9] 郁青. 测雹板标定试验研究. *气象*, 2001, 27(12): 23-25.
- [10] 韩根夫, 刘海月. 应用测雹板评估1998年涞源县防雹效果. *灾害学*, 1999, (4): 46-49.
- [11] Lozowski E P, Strong G S. On the calibration of hailpads. *Journal of Applied Meteorology*, 1978, 17(4): 521-528.
- [12] Long A B, Matson R J, Crow E L. The hailpad: materials, data reduction and calibration. *Journal of Applied Meteorology*, 1980, 19(11): 1300-1313.
- [13] 石安英, 孙玉稳, 田志熙. 冰雹谱分布特征的探讨. *高原气象*, 1989, 8(3): 279-283.
- [14] Waldvogel A, Federer B, Schmid W, et al. The kinetic energy of hailfalls. Part II: Radar and hailpads. *Journal of Applied Meteorology*, 1978, 17(11): 1680-1693.
- [15] Crow E L, Long A B, Dye J E, et al. Results of a randomized hail suppression experiment in northeast Colorado. Part III: Analysis of hailstone size distributions for seeding and yearly effects. *Journal of Applied Meteorology*, 1979, 18(12): 1559-1568.
- [16] Cheng L, English M, Wong R. Hailstone size distributions and their relationship to storm thermodynamics. *Journal of Applied Meteorology*, 1985, 24(10): 1059-1068.
- [17] Fraile R, Castro A, Sánchez J L. Analysis of hailstone size distributions from a hailpad network. *Atmospheric Research*, 1992, 28(3-4): 311-326.
- [18] Sánchez J L, Gil-Robles B, Dessens J, et al. Characterization of hailstone size spectra in hailpad networks in France, Spain, and Argentina. *Atmospheric Research*, 2009, 93(1-3): 0-654.
- [19] Fraile R, Berthet C, Dessens J, et al. Return periods of severe hailfalls computed from hailpad data. *Atmospheric research*, 2003, 67-68: 189-202.
- [20] 张宇镭, 党琰, 贺平安. 利用Pearson相关系数定量分析生物亲缘关系. *计算机工程与应用*, 2005(33): 83-86, 103.
- [21] Palencia C, Castro A, Gaiotti D, et al. Dent overlap in hailpads: error estimation and measurement correction. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(5): 1073-1087.

(上接134页)

英、姚展予等专家教授给予了悉心的指导。西北试验项目首席科学家雷恒池、银燕、张文煜、苏德斌、陈宝君等同仁相互交流技术方法受益匪浅,并特别向参加本文试验工作的纪晓玲、肖云清、刘建军、黄峰、常卓琳、翟涛、曹宁、孙艳桥、马思敏、戴言博、林彤、杨勇、党张利、邓佩云、柳佳俊、厚军学、包亮、贾乐、宁欣婷、杜鑫、饶彤华、贾永辉、张宏元、杨文海、景博、王博、武军军、雷学锋、龚晓丽、裴小龙、于冬梅、马霞、马兴明、温芸芸、田惠、祁菲、马兴武、罗进云、杨晨、储永伟等同志一并致谢!

参考文献

- [1] 毛节泰, 郑国光. 对人工影响天气若干问题的探讨. *应用气象学报*, 2006, 17(5): 643-646.
- [2] 郑国光, 陈跃, 陈添宇, 等. 祁连山夏季地形云综合探测试验. *地球科学进展*, 2011, 26(10): 1057-1070.
- [3] 陈添宇, 郑国光, 陈跃, 等. 祁连山夏季西南气流背景下地形云形成和演化的观测研究. *高原气象*, 2010, 29(1): 152-163.
- [4] 黄美元. 我国人工降水亟待解决的问题和发展思路. *气候与环境研究*, 2011, 16(5): 543-550.
- [5] 郑国光, 郭学良. 人工影响天气科学技术现状及发展趋势. *中国工程科学*, 2012, 14(9): 20-27.
- [6] 洪延超, 雷恒池. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考. *气候与环境研究*, 2012, 17(6): 951-967.
- [7] 许焕斌. 人工影响天气动力学研究(第二版). 北京: 气象出版社, 2017.
- [8] 濮江平, 赵国强, 蔡定军, 等. Parsivel激光降水粒子谱仪及其在气象领域的应用. *气象与环境科学*, 2007, 30(2): 3-8.
- [9] 濮江平, 张伟, 姜爱军, 等. 利用激光降水粒子谱仪研究雨滴谱分布特性. *气象科学*, 2010, 30(5): 701-707.
- [10] 郭欣, 郭学良, 付丹红, 等. 钟形地形动力抬升和重力波传播与地形云和降水形成关系研究. *大气科学*, 2012, 37(4): 786-800.
- [11] 许焕斌, 尹金. 方关于发展人工影响天气数值模式的一些问题. *气象学报*, 2017, 57(1): 57-66.
- [12] 马学谦, 陈跃, 张国庆, 等. X波段双偏振雷达对不同坡度地形云探测个例分析. *干旱气象*, 2015, 37(4): 675-683.
- [13] 吴香华, 牛生杰, 金德镇, 等. 自然降水变异对人工增雨效果评估的影响. *中国科学(地球科学)*, 2015, 45(7): 1011-1019.
- [14] Pu P M, Pu J P. Strategy & techniques for restoration of healthy aqua ecosystem from toxic super eutrophic water body. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2015, 3: 55-61.
- [15] 濮培民, 濮江平, 朱政宾. 水分子结构模式及液态固态水若干特征成因探讨. *气象科学*, 2016, 36(5): 567-580.
- [16] Pu P M, Pu J P, Zhu Z B. Liquid water skin structure & its influence on atmospheric electric fields. *SCIREA Journal of Geosciences*, 2017, 2(2): 39-55.
- [17] 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观特征观测分析. *气象科学*, 2019, 39(6): 775-785.
- [18] 韩世昌, 王博, 汤效军. 固原市人工影响天气作业的现状与思考. *甘肃农业*, 2019, 33(11): 56-58.
- [19] 濮江平, 张昊, 周晓, 等. 对流性降水雨滴谱特征及其与雷达反射率因子的对比分析. *气象科学*, 2012, 32(3): 253-259.
- [20] Chen B J, Yin Y. Modeling the impact of aerosols on tropical overshooting thunderstorms and stratospheric water vapor. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: D19203.
- [21] Chen B J, Hu W, Pu J P. Characteristics of the raindrop size distribution for freezing precipitation observed in southern China. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: D06201.