

陕西渭北果业区冰雹研究进展

岳治国^{1, 2} 陈宝君³ 王瑾^{1, 2, 3} 左爱文^{1, 2} 李金辉^{1, 2} 罗俊颖^{1, 2} 朱荣增¹ 花少烽³ 刘佩佩⁴

(1 陕西省人工影响天气中心, 西安 710016; 2 秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室, 西安 710016;

3 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081; 4 陕西省安康市气象局, 安康 725000)

摘要: 简要阐述了开展陕西渭北果业区防雹技术研究试验的重要意义, 讨论了渭北果业区冰雹研究在气候、雷达回波、雹云探空、冰雹微物理、数值模拟和防雹效果等方面的进展, 并对研究试验中存在的问题进行了讨论。这些研究加深了渭北冰雹形成过程的认识, 对研究高效冰雹防御方法和提高冰雹防御效果有重要意义。

关键词: 渭北, 防雹, 防雹效果, 冰雹微物理, 冰雹模拟

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.020

Progress in Hail Research in Weibei Fruit Production Area of Shaanxi Province

Yue Zhiguo^{1, 2}, Chen Baojun³, Wang Jin^{1, 2, 3}, Zuo Aiwen^{1, 2}, Li Jinhui^{1, 2},
Luo Junjie^{1, 2}, Zhu Rongzeng¹, Hua Shaofeng³, Liu Peipei⁴

(1 Center of Weather Modification of Shaanxi Province, Xi'an 710016

2 Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau of Shaanxi Province, Xi'an 710016 3 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081

4 Ankang Meteorological Bureau of Shaan Xi Province, Ankang 725000)

Abstract: This paper briefly describes the significance of research and experiment on hail suppression in Weibei fruit production area of Shaanxi Province. The advances of hail research in Weibei fruit production area in climate, radar echo, sounding of hail cloud, hail microphysics, numerical simulation, hail suppression effect and problems existing in the research are discussed. These results can deepen the understanding of hail formation process in Weibei, and are of great significance to study efficient hail suppression methods and improve hail defense effect.

Keywords: Weibei area, hail suppression, hail suppression effect, hail microphysics, hail simulation

0 引言

陕西是全球集中连片种植苹果的最大区域, 苹果产量占全国产量的25%, 是中国苹果生产第一大省。陕西渭北一般是指渭河以北、延安以南的地区, 苹果是当地主要经济作物, 农民脱贫致富的主要产业。陕西渭北地形沟壑纵横, 是典型的干旱半干旱地区, 冬、春季干旱, 6—9月降水以局地对流天气为主, 强对流天气频发, 降雹概率高。渭北地区每年3~5次的大范围区域性冰雹天气, 严重影响苹果的产量与品质, 对陕西果业生产构成了极大的威胁。

20世纪90年代, 陕西省人工影响天气中心联合

中国科学院大气物理研究所旬邑县作为防雹外场基地, 布设711型数字化天气雷达、测雹板、雹雨分离器、移动探空等设备, 开展冰雹云外场观测和数值模拟研究, 组织咸阳北五县开展冰雹联防^[1-5]。其中, 冰雹云与雷雨云识别指标、冰雹云作业时机、作业用弹量等研究成果被中国气象局《高炮人工防雹增雨作业业务规范》采用, 指导了全国的防雹作业。

在《西北区域人工影响天气能力建设项目》支持下, 对陕西渭北果业区冰雹的气候、雷达回波、微物理特征、数值模拟和防雹效果等方面开展研究。陕西渭北果业区防雹试验区包括咸阳市北五县(旬邑、长武、彬县、永寿、淳化, 面积共5329 km²), 外场试验基地设在旬邑县。该试验区现有固定人影作业点58个, 其中42个作业点同时装备有火箭发射架和高射炮。旬邑县建有X波段双偏振多普勒天气雷达1部, 可用于研究试验和指挥防雹作业。以旬邑为基地开展综合外场试验, 可与20年前研究试验结果进行对比, 以

收稿日期: 2020年1月7日; 修回日期: 2021年2月4日
第一作者: 岳治国(1977—), Email: yue_zhiguo@163.com
资助信息: 国家重点研发计划(2018YFC1507903); 西北区域人影科学试验研究项目(RYSY201905, ZQC-R18210); 陕西省重点研发计划项目(2020SF-429); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J040)

研究冰雹云结构和成雹机制是否变化,防雹作业指标是否需要调整等。

1 渭北冰雹气候特征

通过分析1960—2019年观测记录完整的45个陕西地面气象站雹日数据可见,陕西降雹日分布的特点是陕北多于关中、陕南和关中的北部塬区多于关中南部川道,陕南山区多于河谷。渭北各地年均降雹日数为0.5~1.0 d,其中旬邑(1.4 d)为多雹日的县区。关中南部及秦岭以南为冰雹少发区,年冰雹日数均在0.5 d以下。冰雹多发生于5—8月的下午时段,气象站的年雹日减小趋势明显。

冰雹云的形成发展及其移动路径,不仅与地形有关,还取决于高层大气环流。关中地区地形复杂,受西风带、副热带和热带天气系统的相互作用,冰雹的移动路径比较复杂。冰雹的移动路径与当地河流、山谷走向基本一致,并沿河谷向东南移动。有时,冰雹云受500 hPa和700 hPa高空气流的引导,其移动路径为自西向东或自北向南。王宇等^[6]使用2007—2016年旬邑711型(X波段)数字化天气雷达资料和咸阳市降雹资料,统计发现咸阳市的冰雹移动路径与八十年代雹云移动路径差异较大(图1),研究结果对调整农业及果业生产种植分布,科学规划防雹作业站点,提升防雹作业效果有重要意义。

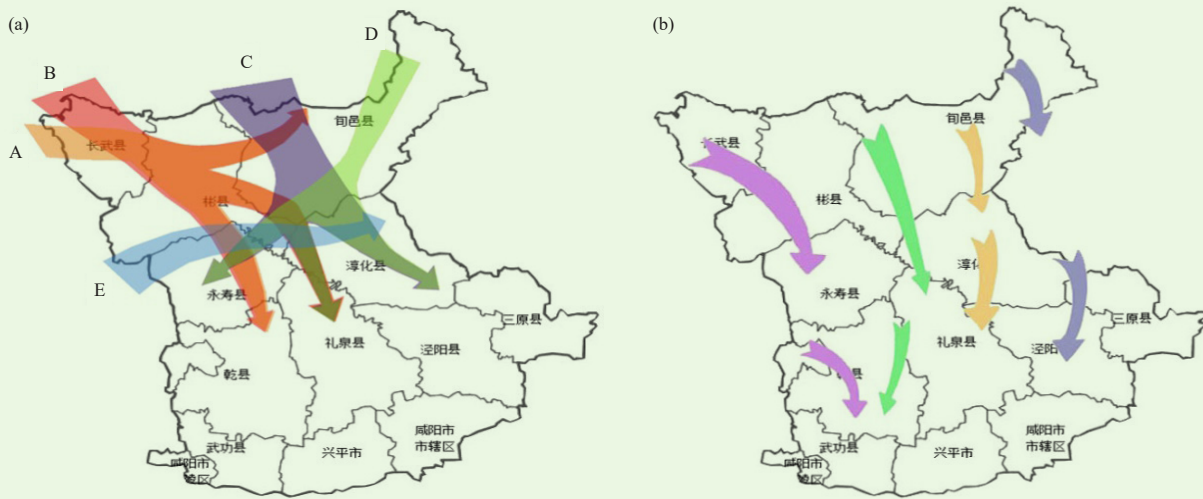


图1 咸阳市冰雹移动路径新(a)和老(b)示意图对比^[6](图中不同颜色箭头代表不同的冰雹移动路径)
Fig. 1 Comparison of new (a) and old (b) hail moving path in Xianyang City^[6] (different color arrows in the figure represent different hail moving paths)

冰雹的发生与一定的大气环流形势密切相关,特别是大范围成灾重的降雹过程,通常是伴随着某些特定天气系统出现。局地热力作用也会产生降雹,但造成的灾害一般不大。渭北降雹天气形势超过70%为西北气流型和冷涡型,冷涡型天气形势常常给渭北地区带来时间长且雹灾严重的区域性降雹^[7-10],如2020年6月24日导致陕西、甘肃和山西等地出现的大范围降雹天气为冷涡型,深厚的冷涡系统在蒙古国维持和发展。

2 冰雹云雷达回波特征

识别非降雹对流云(雷雨云)和冰雹云是雷达实时监测和科学指挥防雹作业的关键技术。研究表明,如果对冰雹云能早期识别和提早作业,可以有效减少雹灾^[1-2]。国内多数省级人影部门都建立了适于本地的雷达识别冰雹云指标,并以此作为是否作业的依据。常用的雷达识别冰雹云指标包括强回波高度、强回波

顶的温度、回波跃增增长、强回波区在云体中的出现位置、初期回波出现的高度和对流单体合并加强等^[5]。

樊鹏等^[5, 11]研究得到陕西冰雹云X波段雷达回波的定量判据为:当雷达回波45 dBz强度顶高于0℃层高度之上2.3 km时识别为冰雹云,即:

$$H_{45dBz} \geq H_0 + 2.3, \quad (1)$$

式中, H_{45dBz} 是雷达观测的45 dBz回波顶高度, H_0 为探空数据0℃层高度,单位:km。近年来,业务一线的防雹指挥人员认为雷达回波满足此公式时已经是冰雹云,实施防雹作业时机偏晚。因此,还需研究和总结新型雷达在渭北地区早期识别冰雹云的指标。

旬邑全固态X波段双线偏振雷达于2016年底投入业务应用,冰雹粒子识别产品对冰雹临近预警有一定指示作用,但有时也会出现空报,还需进一步研究其适用条件。例如,2019年7月12日旬邑县房家底庙作业点加密布设的激光雨滴谱仪记录降雹时间

15: 57—16: 07、冰雹直径5 mm, 旬邑双偏振雷达粒子类别产品显示该地有小冰雹, 但作业点炮手反映无降雹。

冰雹云雷达回波常出现“跃增增长”, 有的雹云在回波强度方面突增, 有的在回波顶高、强度及强回波顶高方面同时出现跃增现象, 这是冰雹云发展的一个重要特征。降雹实况调查表明, 雹云跃增现象都发生在降雹前^[5]。冰雹云“跃增增长”的多为定性指标, 后续研究还需进一步量化这些指标, 可增强对防雹作业的指导意义。

3 冰雹云探空

加强对产生地面降雹的强对流系统内部探测研

究, 可加深对冰雹云温度、湿度、风场特征认识, 探索更有效的人工防雹技术方法。李金辉等^[12]利用火箭探空资料对延安宝塔区冰雹云进行了研究, 结果表明: 冰雹云由低层到高层风向呈逆时针变化; 紧贴0℃下部, 在温度区间-4.8~5.0℃, 维持 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上水平风速, 为冰雹的形成提供了动力场条件; 温度区间-9.2~-8.7℃, 厚度0.2 km, 平均上升速度 $1.79\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最大上升速度 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图2)。遗憾的是, 此次探空数据处于冰雹云移动方向的尾部区域, 探空仪未进入冰雹云的中心, 但这些结果也提高了对冰雹云的认识。

由于冰雹云是小尺度天气系统, 在固定地点观

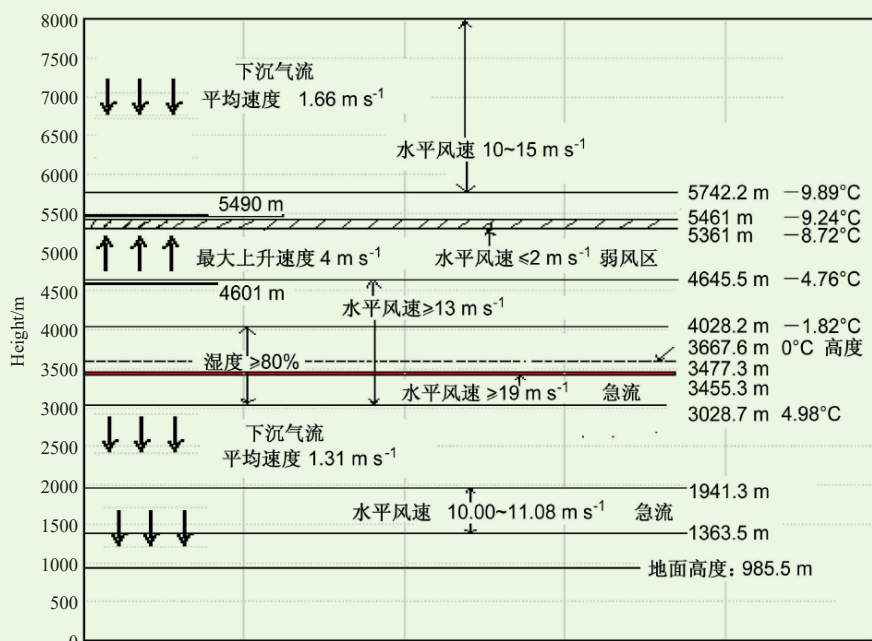


图2 火箭探空冰雹云内部结构示意图^[12]

Fig. 2 Schematic of interior structure of hail cloud detected by sounding rocket^[12]

测冰雹云的机会较小, 研究试验布设在旬邑和洛川的GPS探空设备尚未观测到冰雹云。为了加强渭北冰雹云的观测, 2020年8月在延安宝塔区气象站新布设了1台地基多通道微波辐射计, 可连续反演温度和湿度廓线, 为渭北冰雹云研究提供了新的探测手段。

4 冰雹微物理特征

我国当前使用高炮和火箭防雹的理论基础是影响冰雹形成的物理过程以达到减轻冰雹灾害的目的。冰雹的大小、形状、浓度、密度和末速度等参量与雹灾的程度直接相关, 是冰雹研究的重要特征量。冰雹印迹板是最为广泛使用的累积式测雹办法, 是利用冰雹质量和末速度差异造成的不同印痕来分析雹粒大小、质量等参量。此方法成本低、可供野外大量布设, 可

以指示有无冰雹、估计冰雹大小, 但不能准确获得冰雹大小、降雹时间和冰雹末速度等参量^[13]。

近年来, 随着我国气象观测设备的现代化水平不断提高, 每个气象观测站都布设了激光雨滴谱仪, 根据降水粒子遮挡激光束的范围和时间, 激光雨滴谱仪可得到降水粒子的直径和下落速度。岳治国等^[14]基于激光降水粒子谱仪观测的陕西渭北一次降雹过程的资料, 结合雷达反射率回波和自动站分钟降水量, 分析了降雹过程中的最大冰雹直径、数浓度、谱分布和冰雹末速度等物理量随时间的演变(图3)。该项研究加深了对渭北地面降雹过程的认识。

通过冰雹切片可以研究雹块的冰晶结构、气泡、多层结构和雹胚类型, 间接研究冰雹在雹云内部的生

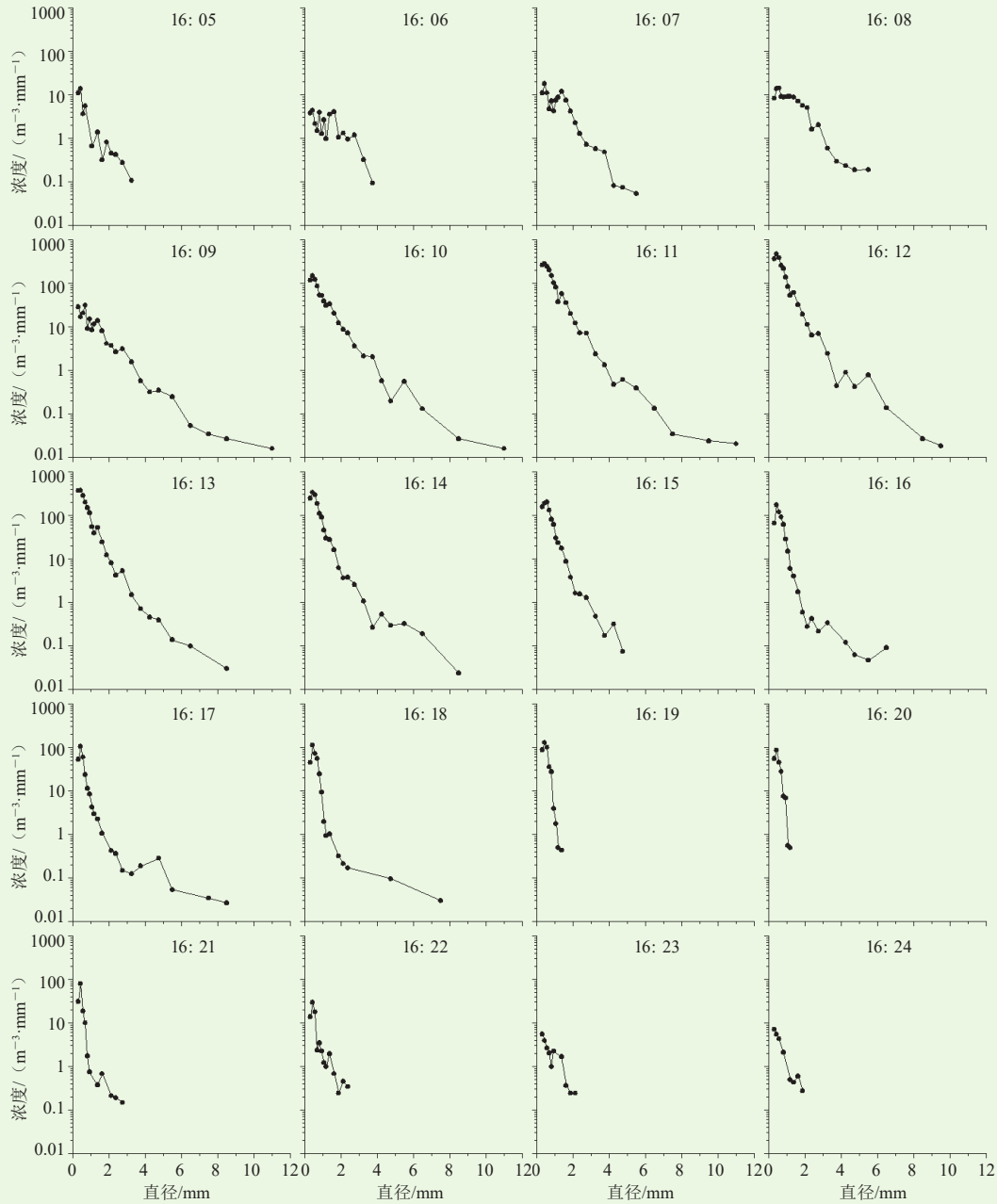


图3 2013年5月22日16: 05—16: 24陕西渭北地区降雹过程中降水粒子谱的演变^[14]

Fig. 3 Temporal evolution of precipitation particles spectra from 16:05 to 16:40 BT in a hailstorm process occurred on 22 May 2013 in Weibei area of Shaanxi Province ^[14]

成环境和成雹机制。从安塞和黄陵两地的冰雹切片(图4)可见, 2020年6月24日陕西渭北中尺度飊线降雹以冻滴雹胚、外层多气泡和球形为主, 外观基本不透明。这两个降雹地点相距150 km, 降雹时间相差2 h, 两地的雹胚和雹块多层结构基本相似, 表明同一对流系统不同部位产生冰雹的云内环境基本相似。

在处于雷达探测范围内、降雹概率大和作业空域批复率高的防雹作业点附近加密布设激光雨滴谱仪和冰雹切片分析, 可提高防雹效果的研究能力。

5 冰雹云数值模拟

冰雹云具有复杂的宏微观结构, 且云体的演变迅速, 现有的观测手段很难了解其全貌。因此, 数值模拟研究是研究冰雹云的重要手段。国内众多学者使用中国科学院大气物理研究所的三维冰雹云模式对冰雹云开展了广泛的研究, 取得了许多重要成果^[1-4,15-16]。随着计算能力和模式模拟能力的提高, 中尺度模式在冰雹模拟研究中得到应用。中尺度WRF-V4.2模式中包含冰雹过程的云微物理方案有Milbrandt2-

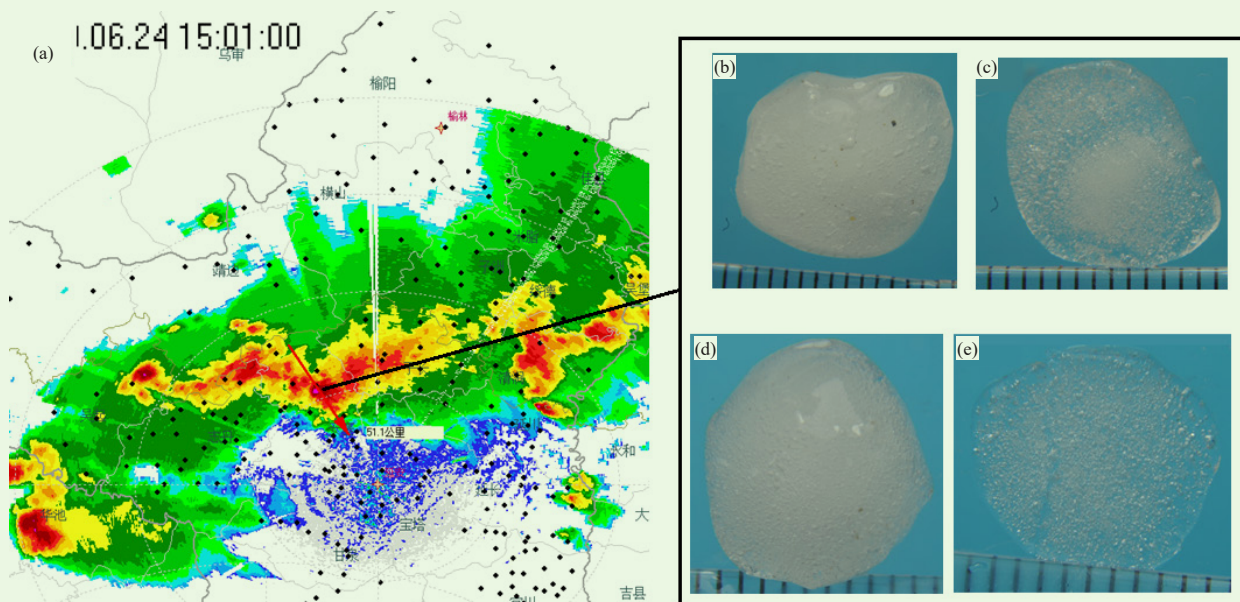


图4 2020年6月24日安塞冰雹切片

(a) 降雹时刻15: 01雷达组合反射率, (b, d) 黑线指向位置的地面冰雹外观, (c, e) 与图4b,4d对应的冰雹切片
Fig. 4 Section of hail in An Sai on 24 June 2020

(a) the combined reflectivity of radar at 15:01 of hail time, (b, d) the appearance of hail on the ground, (c, e) the hail slices corresponding to Figs. 4b,4d

mom、NSSL2-mom、NSSL2-mom+CCN、FastSBM和FullSBM。粒子分档方案FastSBM和FullSBM计算量巨大, 目前难以在业务中应用。通过将Milbrandt2-mom、NSSL2-mom、NSSL2-mom+CCN方案分别应用到2020年6月24日陕西渭北降雹过程的数值模拟, 结

果表明3个微物理方案能较好模拟本次强对流过程。Milbrandt2-mom方案模拟的对流云雷达组合反射率、冰雹落区与实况更加接近。Milbrandt2-mom、NSSL2-mom和NSSL2-mom+CCN三种方案输出的冰雹质量浓度冰雹数浓度, 可应用于冰雹落区预报(图5)。

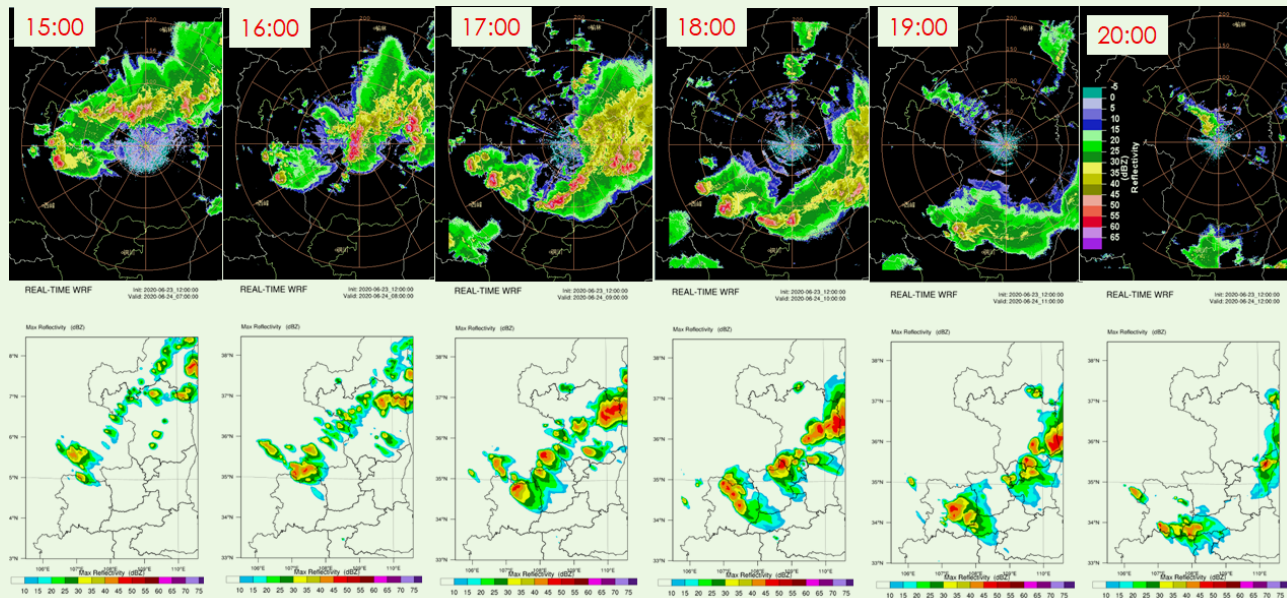


图5 2020年6月24日15—20时实况和模拟雷达组合反射率对比

Fig. 5 Comparison of combined reflectivity of live and simulated radars from 15 to 20 BT on 24 June 2020

利用耦合碘化银(AgI)数值催化模块的中尺度WRF模式, 对2020年5月15日陕西渭北飚线降雹过程

进行了数值催化试验。结果表明在飚线系统对流区的上升区域中播撒碘化银之后, 能够有效地减少地面降

水，而且播撒率越高减雨效果越明显。进一步分析发现播撒碘化银之后，消耗了大量的过冷云水导致霰粒子的含量减少。霰粒子的融化是雨滴的主要来源，所以播撒AgI导致了降水减少。由于Thompson方案中没有冰雹粒子分类，还需开发含有冰雹过程的物理方案中开展冰雹数值催化研究。

6 防雹效果

陈保国等^[13]根据地面雹谱资料对比分析，认为防雹作业区冰雹的动能、质量、动能通量和质量通量分别减少75%、58%、41%和55%，说明防雹效果明显。冰雹云是中小尺度对流系统，具有极高的自然变率，因此，选择对比区研究防雹作业效果的可靠性不高。梁谷等^[17]利用洛川县711数字化天气雷达的探测资料，研究了2005年5月30日大范围强降雪过程中洛川县防雹作业。认为防雹效果明显的主要原因为作业时机早、作业量大和采用了合适的作业方式。

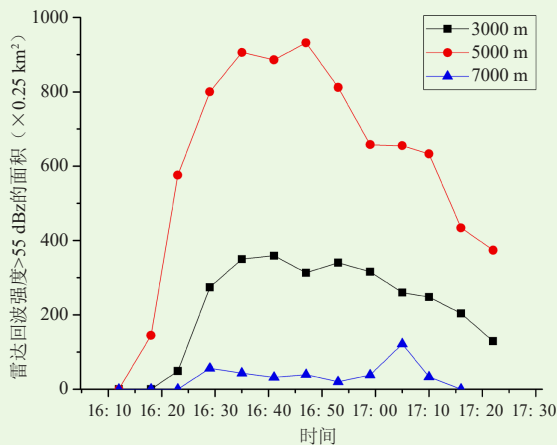


图6 富县2020年6月24日防雹作业过程中3 km、5 km、7 km 等高面上大于55 dBz回波区面积变化

Fig. 6 Area change of echo greater than 55 dBz on 3 km, 5 km and 7 km altitude during hail suppression operation in Fuxian County on 24 June 2020

2020年6月24日16:18—17:30(图6)，冰雹云经过渭北中部地区的富县防雹作业点都实施了作业，19个作业点在1小时12分钟内共发519发炮弹和31枚火箭弹。作业后，富县7个作业点出现黄豆大小的零星冰雹，无灾情。对实施防雹作业的对流云团3 km、5 km、7 km等高面上的回波强度面积跟踪统计可见，实施防雹作业过程中5 km等高面上大于55 dBz强回波面积减小明显。这个结果定性表明防雹作业减小了强回波区域面积，从而减少了雹灾。

参考文献

- [1] 肖辉, 吴玉霞, 胡朝霞, 等. 旬邑地区冰雹云的早期识别及数值模拟. 高原气象, 2002, 21(2): 159-166.
- [2] 李宏宇, 胡朝霞, 肖辉, 等. 人工防雹实用催化方法数值研究. 大气科学, 2003, 27(2): 212-222.
- [3] 周玲, 陈宝君, 李子华, 等. 冰雹云中累积区与冰雹的形成的数值模拟研究. 大气科学, 2001, 25(4): 536-550.
- [4] 胡朝霞, 李宏宇, 肖辉, 等. 旬邑冰雹云的数值模拟及累积带特征. 气候与环境研究, 2003, 8(2): 196-208.
- [5] 樊鹏, 肖辉. 雷达识别渭北地区冰雹云技术研究. 气象, 2005, 31(7): 16-19.
- [6] 王宇, 谢越, 马文, 等. 咸阳市冰雹路径研究. 陕西气象, 2021, (1): 28-32.
- [7] 朱爱荣. 陕西冰雹天气气候特征及其预报. 陕西气象, 1995, (1): 39-42, 45.
- [8] 詹维泰, 乔旭霞, 景东侠. 陕西初夏冰雹天气气候特征及预报. 陕西气象, 1994, (3): 23-26.
- [9] 罗俊颖, 刘跃峰. 旬邑冰雹天气特征分析及特异路径研究. 陕西气象, 2001, (4): 7-9.
- [10] 刘嘉慧敏, 郑然, 梁绵, 等. 2018年陕西商洛一次罕见强雹暴环境条件及雷达特征分析. 陕西气象, 2020, (2): 1-11.
- [11] 李金辉, 樊鹏. 冰雹云提前识别技术研究. 陕西气象, 2007, (2): 1-4.
- [12] 李金辉, 田显, 岳治国. 基于火箭探空资料的冰雹云内部结构个例分析. 大气科学, 2020, 44(4): 748-760.
- [13] 陈保国, 栗珂, 樊鹏, 等. 陕西旬邑冰雹谱特征和防雹效果分析. 陕西气象, 2003, (2): 8-12.
- [14] 岳治国, 梁谷. 陕西渭北一次降雪过程的粒子谱特征分析. 高原气象, 2018, 37(6): 1716-1724.
- [15] 洪延超. 三维冰雹云催化数值模式. 气象学报, 1998, 56(6): 3-5.
- [16] 郭学良, 黄美元, 洪延超, 等. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究 I. 模式建立及冰雹的循环增长机制. 大气科学, 2001, 25(5): 707-720.
- [17] 梁谷, 李燕, 董文乾, 等. 2005-05-30洛川县防雹作业效果分析. 陕西气象, 2006(05): 19-22.