

青海省东部农业区多点联合防雹个例分析

朱世珍 龚静 张玉欣 王丽霞 张博越

(青海省气象灾害防御技术中心, 西宁 810001)

摘要: 雹云发展变化的物理过程研究, 对进一步认识冰雹云, 总结人工防雹作业经验, 提高人工防雹的作业水平具有重要意义。利用多普勒雷达资料和MICAPS常规观测资料等, 从天气形势、环境条件、回波演变及效果检验等方面, 对2020年7月1日发生在青海省东部农业区的一次多点联合防雹个例进行分析。结果表明: 雷达图上多个对流单体的合并, 有利于雹云进一步发展; 作业后回波最大强度、30 dBZ回波顶高、 $CR \geq 45$ dBZ回波面积等均明显减弱; 作业后5 min, 作业区平均雨量出现跃增现象。在雹云跃增阶段、移动方向前沿进行多点联合过量播撒作业, 能起到良好的防雹效果。

关键词: 青海省东部农业区, 人工防雹, 联合作业

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.04.008

Case Analysis of Multi-Point Joint Hail Prevention in the Eastern Agricultural Region of Qinghai Province

Zhu Shizhen, Gong Jing, Zhang Yuxin, Wang Lixia, Zhang Boyue

(Meteorological Disaster Prevention Technology Center in Qinghai Province, Xining 810001)

Abstract: Study on the physical process of hail cloud development is of great significance for further understanding of hail cloud, summarizing the experience and improving the level of artificial hail prevention operation. Using Doppler radar data and MICAPS conventional observation data, a multi-point joint hail prevention case on 1 July 2020 in the eastern agricultural area of Qinghai Province is analyzed, from the aspects of synoptic situation, environmental conditions, echo evolution and effect inspection. The result shows that the combination of multiple convective cells on the radar chart is beneficial to the further development of hail clouds. After the operation, the maximum echo intensity, the 30 dBZ echo top height, and the $CR \geq 45$ dBZ echo area were significantly reduced; 5 minutes after the operation, the average rainfall in the operation area increased sharply. During the hail cloud development, the multi-point joint over-seeding operation in front of the moving direction will exert positive effect on hail prevention.

Keywords: eastern agricultural region of Qinghai Province, artificial hail prevention, joint operation

0 引言

冰雹是世界上很多地方经常出现的一种自然灾害, 对农业、工业、交通等都有影响, 且大多发生在夏季作物抽穗至黄熟阶段, 对农作物的危害尤其严重^[1-4]。了解雷暴云与降雹变化的物理过程, 实施科学防雹作业及作业后效果评估, 对于减少冰雹所造成的损失, 提高人工防雹作业的科学有效性, 推动云和降水以及人工影响天气理论的发展具有重要意义^[5-9]。长期实践表明, 利用高炮进行人工防雹作业是一种有效的方法, 与相同条件下未开展人工防雹作业的单体相比, 开展人工防雹作业的雹云单体雷达回波减弱速度

更快、生命史更短, 人工防雹能有效减少雹灾和直接经济损失^[10-14]。

有关冰雹监测预警方法和人工防雹技术已有很多研究。肖辉等^[15]对陕西旬邑地区的防雹试验研究表明, 以45 dBZ回波顶高 ≥ 7.0 km, 或以45 dBZ回波顶温度 < -14 °C, 作为识别冰雹云的指标, 再根据强回波生长情况, 可提前5~10 min识别出冰雹云。付双喜等^[16]利用兰州多普勒雷达资料中垂直累积液态含水量(VIL)产品资料, 并结合甘肃中部地区降雨和降雹实测资料, 提出了VIL识别冰雹云的判别指标, 当VIL > 7.0 kg/m²时, 预示有强对流天气特别是冰雹天气的出现, 可提前20 min预测降雹。王昂生等^[17]在对昔阳地区冰雹云的研究中, 概括出雹云单体生命史演变分“发生、跃增、酝酿、降雹、消亡”5个阶段, 作业时应当选择在发生、跃增、酝酿阶段。田涵元等^[18]研究指出影响人工防雹作业效果的主要因素是防雹时间

收稿日期: 2022年5月12日; 修回日期: 2023年3月29日

第一作者: 朱世珍(1997—), Email: 2460126652@qq.com

通信作者: 龚静(1969—), Email: 554663678@qq.com

资助信息: 青海省气象灾害防御技术中心青年科研基金项目 (fzjj2021-03)

和范围的选择,另外还对对流云单体的特征、季节等有密切关系。目前虽然已有一些人工防雹个例相关研究,但在雹云移动方向前沿开展区域联防作业的个例较少^[19-23],且由于自然降雹的变率大,冰雹的局地性也较强,目前人工防雹理论水平还不够成熟,需要因地制宜地开展防雹作业。

青海省地处青藏高原东北部,地形复杂,天气多变,多冰雹。尤其在夏季白天,高原的加热作用使局地辐合上升运动增强了大气的的不稳定性,为对流天气的发生发展提供了有利条件,使这里成为雹灾多发区^[24-25]。受山脉走势和大气气流的影响,发源于祁连山地区,沿西北—东南走向影响青海东北部是青海地区冰雹的最主要路径。在时间分布上,5—9月冰雹占全年总数的98.6%,其中7月发生最多,占34.9%^[26]。冰雹会给农业生产带来极大危害,适时开展科学有效的防雹作业能带来明显的经济效益。7月是防雹作业较为集中的时期,但在实际防雹作业时,由于作业时空域申请未能及时得到空管部门批准而错过最佳作业时机、作业区域的云系不具备防雹作业条件等原因,

能在合适的作业时机、合适的作业部位、以合适的作业剂量实现多点联合防雹的个例较少。

2020年7月1日防雹个例为一次防雹作业较为及时合理、作业效果较为良好的个例。本文利用西宁CINRAD/CD多普勒雷达资料、MICAPS常规观测资料等,从天气形势、环境条件、回波演变及防雹作业情况、效果检验等方面,对这次青海东部海东市乐都区的典型多点联合防雹作业个例进行了简要分析,为该地区冰雹监测及防雹作业指挥提供决策依据。

1 天气形势

7月1日08:00(北京时,下同)在500 hPa(图1a),自青海东北边缘到四川盆地西部有一槽线,青海西南部有一高压脊,整个青海东部处于槽后脊前西北气流中,风速大概12 m/s,有较强冷平流。14:00地面图上(图1b),海东附近有23℃的暖中心,暖中心附近有一气旋性辐合。上冷下暖的垂直结构有利于大气层结不稳定。且地面气旋性辐合、局地热力环流、地形抬升对局地强对流天气有触发作用。

根据7月1日08:00西宁站探空资料(图2a),

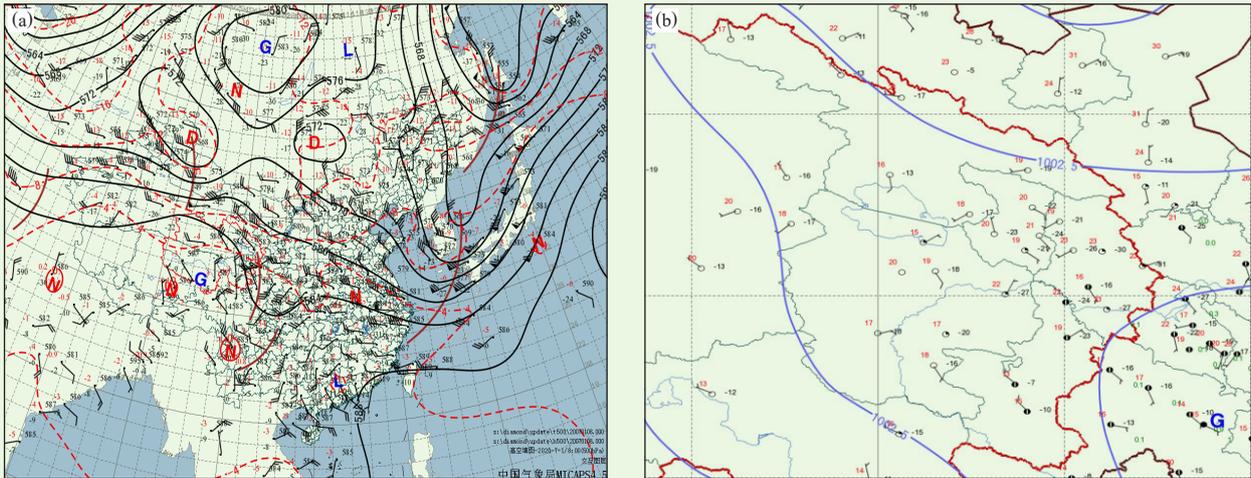


图1 2020年7月1日08:00的500 hPa形势图(a)和14:00地面图(b)
Fig. 1 500 hPa situation field at 08:00 BT (a) and ground map at 14:00 BT (b) on 1 July 2020

400 hPa以下,层结曲线与状态曲线几乎重合,温度与露点相差不大,且风向随高度顺转,说明08:00大气为中性层结,低层湿度条件较好,且有暖平流。400 hPa以上有明显的干空气层,温湿层结曲线形成向上开口的喇叭形状,大气“上干冷,下暖湿”特征明显,有利于形成热力不稳定条件。由于高原夏季午后陆地表面受日射而强烈加热,有利于在近地层形成绝对不稳定的层结,形成对流,此次对流活动发生在傍晚,因此很难根据08:00的探空状态判断傍晚的对流潜势。利用16:00地面温度、露点进行探空订正后,

CAPE值由21.8 J/kg增加到1551.9 J/kg,说明大气层结向不稳定方向发展。0℃层高度在4539 m,−20℃层高度在8010 m,高度适宜,有利于冰雹的形成^[27]。20:00(图2b),整层不稳定能量减少,对流层低层湿度条件变差,对流活动明显减弱。

2 防雹作业概况

青海省东部农业区包括门源、大通、湟中、湟源、平安、乐都、互助、民和、循化、化隆、尖扎和同仁12个县(区),为全省主要农业区,也是全省的雹灾高发区^[28]。自1961年来的近60 a的资料分析表明,

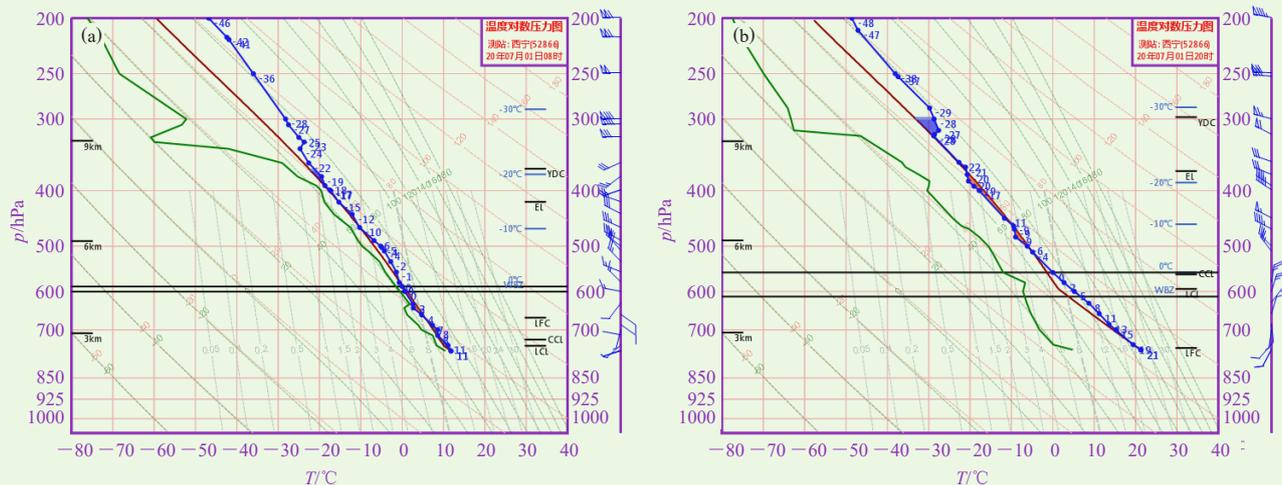


图2 2020年7月1日08:00 (a)和20:00 (b) 西宁站 T - $\ln p$ 图
Fig. 2 The T - $\ln p$ diagram of Xining Station at 08:00 BT (a) and 20:00 BT (b) on 1 July 2020

东部农业区的降雹天气具有明显的空间分布差异，降雹日数与海拔高度呈正相关，呈西北多，东南少的特征。且东部农业区降雹日数总体呈明显减少趋势，这除了与气候变暖背景下南北纬气温梯度下降、大气环流减弱等因素有关，可能也与人工防雹抑制减少了冰雹的出现有一定联系^[29]。

2020年7月1日下午，受高空槽后冷平流影响，青海省东部农业区出现了一次大范围的强对流天气过程。14:00，青海湖以北至祁连山一带有大量零星对流云单体生成；17:00，几个先后发展起来的对流云逐渐合并，形成一条东西向的带状回波，自西北向东南方以约40 km/h的速度移动；21:00，对流云逐渐消散于海东市南部与甘肃省交界处。从图3可以看出云带的移向和演变，以及云带相对于作业点的位置。17:00—18:40，湟源、湟中、互助三县和海东市乐都区相继遭受冰雹袭击，直径在1~9 mm，持续时间为1~14 min。18:41—18:44，海东市乐都区在雹云移动方向前沿的瞿县、蒲台、中坝、城台四个乡镇实施了地面联合防雹作业，曲坛乡吴家台村、蒲台乡黑窑洞村、城台乡拉尕邑岭村和中坝乡泉脑村四个作业点同时进行高炮作业，分别消耗炮弹60、60、60、50发，共计230发。

3 作业效果分析

多普勒天气雷达能及时地监测对流单体的发生、发展及其演变，在提前识别冰雹云、选择判别作业时机、作业后效果检验中都能起到很好的作用。本文利用中国气象局人工影响天气中心研发的云降水精细处理系统(CPAS)，对2020年7月1日西宁站CINRAD/CD多普勒雷达资料进行了处理，统计计算

得到目标云人工防雹作业前后雷达回波最大反射率、30 dBZ回波顶高、组合反射率(CR) ≥ 45 dBZ回波面积、VIL ≥ 10 kg/m²回波面积等参数的变化，进行作业效果的物理检验。多普勒天气雷达完成体积扫描周期为6 min左右，统计计算得到的各个参数也均为6 min左右时间分辨率的数据资料。

3.1 雷达回波参量分析

14:00开始，海北州海晏、门源、西宁市大通及海东市互助境内有对流回波出现，经过一系列合并发展之后，带状回波强度面积逐渐增大，形状变为椭圆形，强度不断增强，逐渐移至乐都境内。如图4a，18:39，强回波中心位于乐都区岗沟镇，回波最大强度61 dBZ，回波顶高达到10 km，30 dBZ回波顶高达到7 km，VIL达到30 kg/m²；RHI图像上，出现明显的穹隆回波、回波墙、悬挂回波和旁瓣假回波等冰雹云回波的一些明显特征，主回波顶在峰前出现“V”形缺口(图5a)。许焕斌等^[30]运用三维冰雹云模式模拟再现了这种现象，发现RHI主回波顶前的“V”形缺口，表征云中上升气流十分强大，以致对平流层产生强烈冲击，是强冰雹云形成的标志之一。18:41—18:44，青海省人工影响天气办公室(简称“人影办”)组织乐都区人影办在雹云移动方向前沿的瞿县、蒲台、中坝、城台四个乡镇实施了地面联合防雹作业，作业点分布情况如图4a所示。18:44，回波最大强度减小到57 dBZ(图4b)，回波顶高仍在10 km，30 dBZ回波顶高降低了1 km，降到6 km，VIL降到25 kg/m²，穹隆回波特征明显减弱(图5b)。根据青海省气候中心提供的2020年的降雹日、降雹直径和降雹持续时间等资料，18:41，乐都本站出现了持续时间小于1 min、直径为

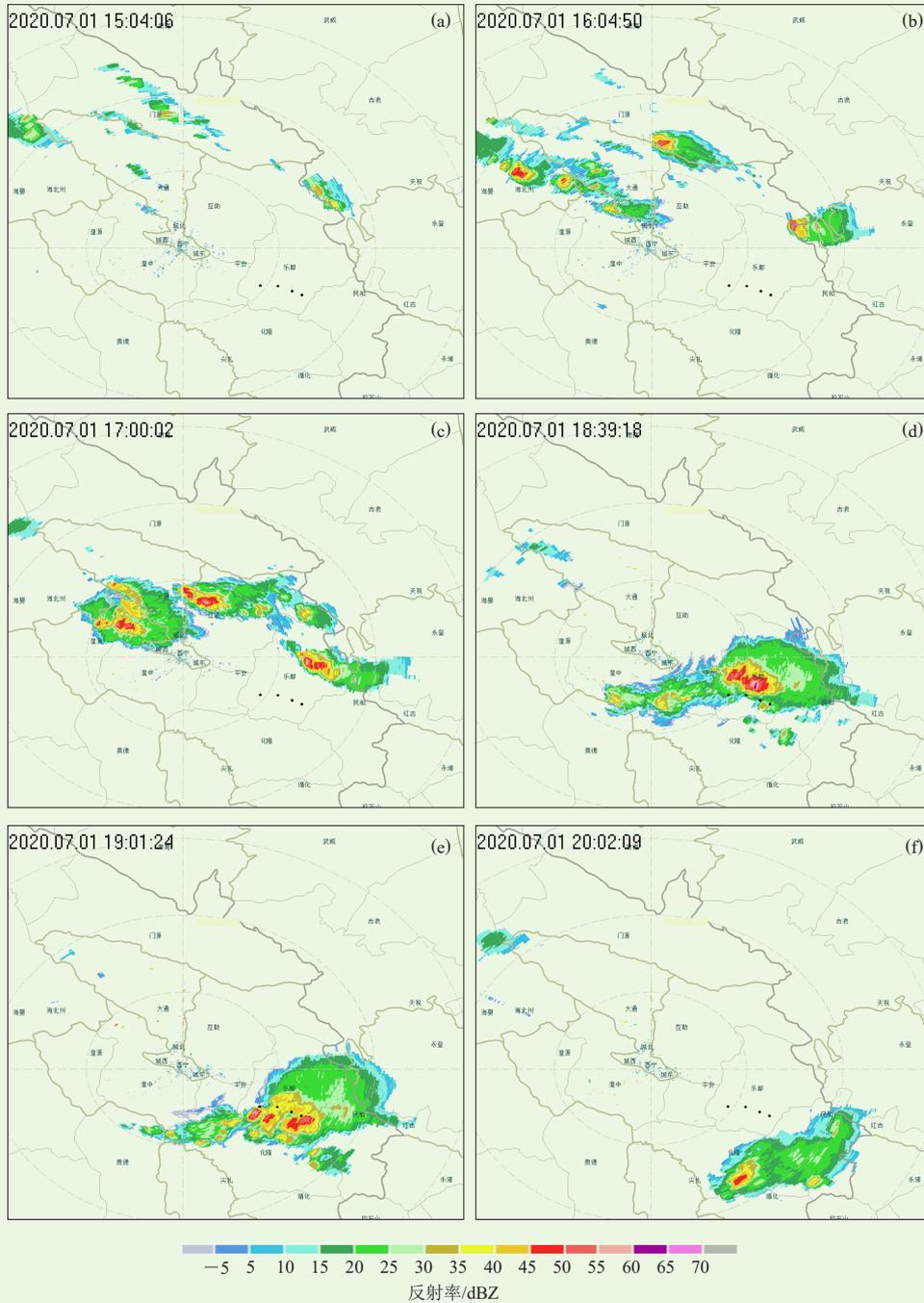


图3 2020年7月1日西宁雷达组合反射率图 (图中黑点表示此次对目标云作业的四个作业点)
(a) 15: 04; (b) 16: 04; (c) 17: 00; (d) 18: 39; (e) 19: 01; (f) 20: 02

Fig. 3 Radar combined reflectivity map over Xining on 1 July 2020 (Black dots representing the four operating points of the target cloud operation)

(a) 15:04 BT; (b) 16:04 BT; (c) 17:00 BT; (d) 18:39 BT; (e) 19:01 BT; (f) 20:02 BT

1 mm的小冰雹。18: 39—18: 43, 位于强回波边缘的洪水镇、蒲台乡、高庙镇出现冰雹, 直径4~5 mm, 使农作物受灾。其中, 实施了防雹作业的蒲台乡受灾村数及受灾人口明显低于洪水和高庙镇(数据来源: 中国气象局气象灾害管理系统, <http://10.1.64.146/disaster/index>)。18: 44之后, 回波强度逐渐减弱, 强回

波面积不断减小直至消散。

目标云作业前后30 min回波最大反射率、30 dBZ回波顶高、CR \geq 45 dBZ回波面积、VIL \geq 10 kg/m²回波面积变化如图6所示, 图中阴影柱表示防雹作业时段。18: 11—18: 28, 雹云处于平稳发展阶段, 回波最大反射率和30 dBZ回波顶高变化不大,

CR \geq 45 dBZ的回波面积和VIL \geq 10 kg/m²的面积逐渐增大。18:28—18:39,回波最大反射率突然增大,前5 min内由57 dBZ增大到61 dBZ,30 dBZ回波顶高维持在7 km,CR \geq 45 dBZ的回波面积在后6 min内明显增长,由1200 km²增大到1458 km²,VIL \geq 10 kg/m²的面积不断增大,18:39增大到4821 km²,这种现象被称为冰雹云的“跃增增长”现象。出现“跃增增长”时,45 dBZ强回波区比0 dBZ回波区增长得更快,云内上升气流特别强,之后在地面都有降雹,是冰雹云从生成到发展再到成熟过程中的一个明显特征^[31]。18:41—18:44,冰雹移动方向前沿的四个作

业点同时进行了高炮防雹作业,消耗炮弹230发。作业后1 min,回波最大反射率从61 dBZ下降到57 dBZ,30 dBZ回波顶高由7 km降至6 km,CR \geq 45 dBZ的回波面积明显减小,由1458 km²降至1022 km²,VIL \geq 10 kg/m²的面积由4821 km²降至4488 km²。作业后30 min,VIL \geq 10 kg/m²的面积不断减小,回波最大反射率、30 dBZ回波顶高、CR \geq 45 dBZ的回波面积先不断减弱,之后小幅回升后又趋于减弱,这可能与雹云被短暂抑制后,又有新生对流单体的发展与消亡有关。以上参数的变化说明人工防雹可能对于冰雹云的结构有一定影响,对于雹云有一定的抑制作用。

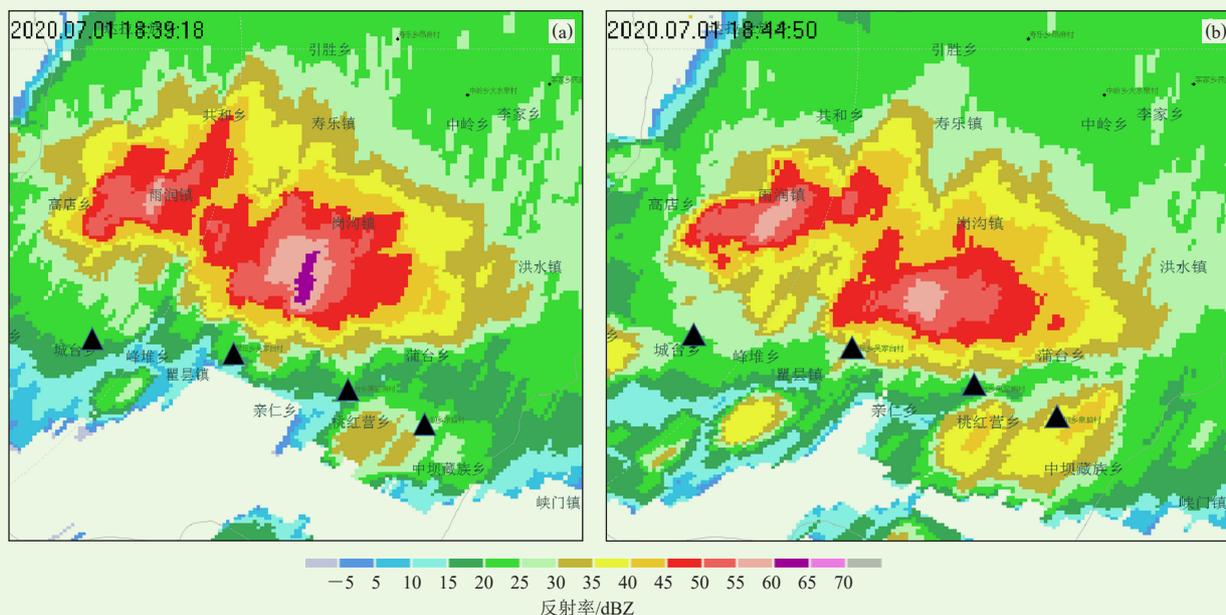


图4 2020年7月1日防雹作业前(a)和作业后(b)西宁雷达组合反射率图(图中黑色三角形表示此次对目标云作业的四个作业点)
Fig. 4 Radar combined reflectivity map over Xining before (a) and after (b) the hail prevention operation on 1 July 2020 (Black triangles representing the four operating points of the target cloud operation)

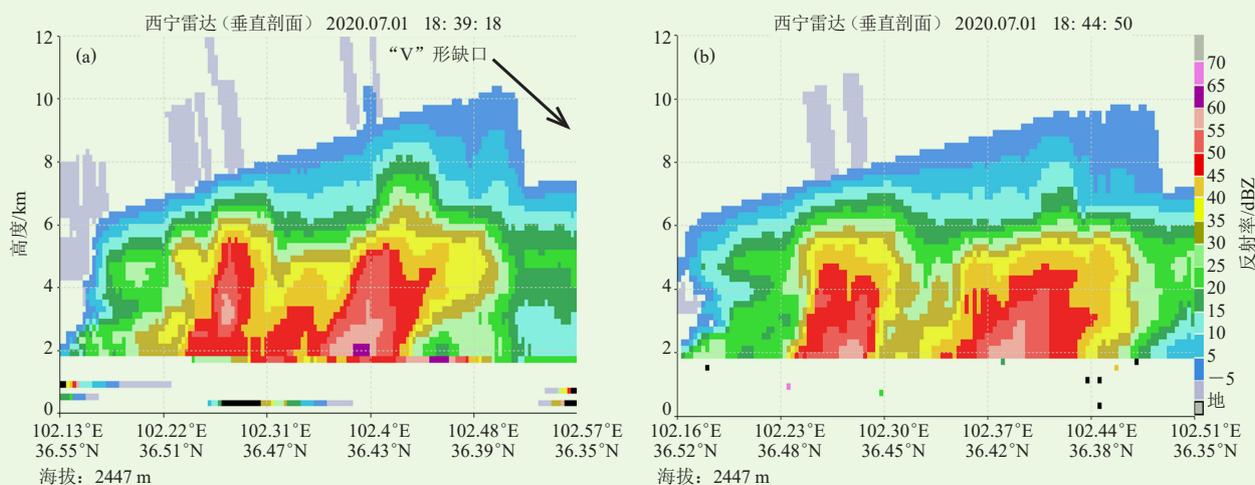


图5 2020年7月1日防雹作业前(a)和作业后(b)西宁雷达反射率因子垂直剖面
Fig. 5 Vertical profile of radar reflectivity factor over Xining before (a) and after (b) the hail prevention operation on 1 July 2020

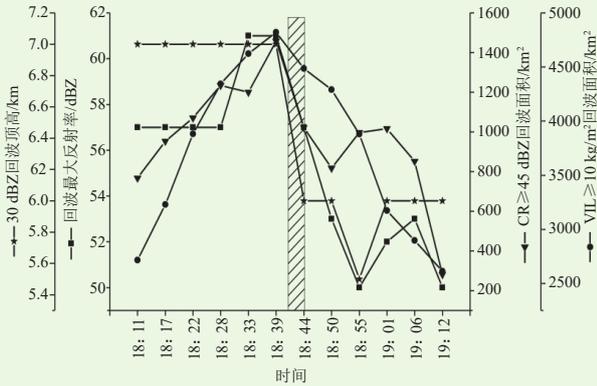


图6 2020年7月1日防雹作业前后回波最大反射率、30 dBZ回波顶高、CR≥45 dBZ回波面积、VIL≥10 kg/m²回波面积演变图 (图中阴影部分表示防雹作业时段)

Fig. 6 Echo maximum reflectivity, 30 dBZ echo top height, CR≥45 dBZ echo area, and VIL≥10 kg/m² echo area evolution diagram before and after the hail prevention operation on 1 July 2020 (the shaded part indicating the time period of hail prevention operation)

根据各地实际经验^[31], 一块冰雹云移经一个高炮作业点, 对于复合单体雹云, 跃增阶段用弹量一般<50发, 酝酿阶段为50~100发, 总用弹量<150发。18:41—18:44, 乐都区在雹云移动方向前沿的四个乡镇相邻炮点进行了同时作业, 作业时机选择在雹云跃增阶段, 作业时机基本合理; 四个炮点消耗炮弹均≥50发, 大于跃增阶段所需用弹量, 因此此次防雹属于过量催化作业, 作业剂量基本合理; 四个炮点正好位于云系发展的路径上, 布局自西北向东南方向, 作业位置位于雹云的前端、中间及末端, 根据雷达及实施作业炮点位置及方位角估算, 实施作业部位选择在多单体强回波中心, 作业部位基本合理。

3.2 雨量分析

为研究高炮防雹在抑制雹云发展的同时对降水的影响, 将目标区内所有自动站的5 min累计雨量求平均, 作为作业区平均雨量, 作业区作业前后雨量变化如图7所示。作业前, 5 min平均雨量大部分在0.8 mm以下, 18:41—18:44实施作业, 作业后5 min之内, 作业区平均雨量出现跃增, 从0.89 mm增加到1.35 mm, 然后平均降雨量又有所回落, 降到0.6 mm以下, 之后波动减小, 19:45有小幅增长之后, 又不断减小。与王芳等^[32]在川西地区的一次人工防雹作业中发现作业前无降水, 作业后1 h内突然产生大量级降水的结果较为一致, 也与我国20世纪开展的土炮和高炮人工降水和防雹试验中, 发现炮击后几分钟, 原来不下雨的云落下雨滴, 原来下雨的云出现短时间内雨滴加大、加密现象, 即“炮响雨落”现象相一致^[33]。

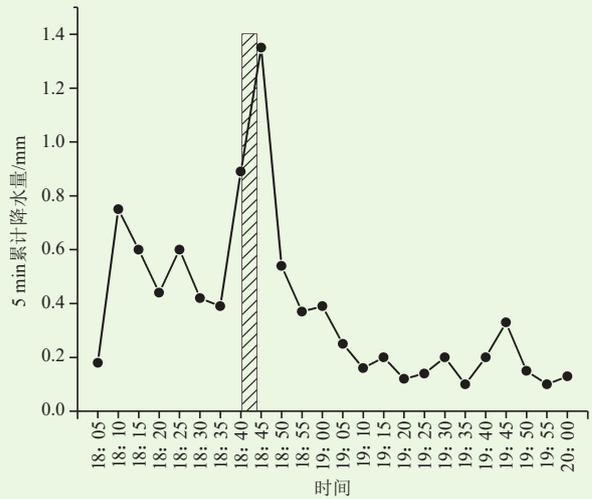


图7 2020年7月1日防雹作业前后目标区内5 min平均累计雨量演变图 (图中阴影部分表示防雹作业时段)

Fig. 7 The evolution of the 5 minute average accumulated rainfall in the target area before and after the hail prevention operation on 1 July 2020 (the shaded part indicating the time period of the hail prevention operation)

4 结论与讨论

本文以2020年7月1日青海省海东市乐都区实施的一次典型多点联合防雹作业个例为例, 分析了此次冰雹产生的天气背景和人工防雹作业情况, 并利用雷达、雨量数据来检验防雹效果, 为该地区冰雹监测及人工防雹作业指挥提供决策依据。

1) 此次降雹过程中, 500 hPa高空槽后冷平流, 400 hPa以下低层湿度条件较好且风向随高度顺转, 有暖平流, 上冷下暖的垂直结构有利于大气层结不稳定。午后高原地面的强烈加热作用, 使大气层结向不稳定方向发展。地面气旋性辐合、局地热力环流、地形抬升对局地强对流天气有触发作用。

2) 乐都区人影办在雹云处于跃增阶段时, 在移动方向前沿的四个乡镇相邻炮点进行了同时过量催化作业, 实施作业部位选择在多单体强回波中心, 共消耗炮弹230发, 作业时机、作业部位、作业剂量均合理。防雹作业后1 min, 回波最大反射率从61 dBZ下降到57 dBZ, 30 dBZ回波顶高由7 km下降至6 km, CR≥45 dBZ的面积由1458 km²降至1022 km², VIL≥10 kg/m²的面积由4821 km²降至4488 km²; 作业后30 min, 以上各参数均趋于减小; 作业后5 min, 作业区平均雨量出现跃增现象。说明防雹对雹云有一定的抑制作用; 在雹云跃增阶段进行多点联合过量播撒作业, 能起到良好的防雹效果。

3) 本文仅针对一次防雹个例进行分析, 样本不足, 且由于此次个例利用的观测资料较少, 未能对防

雹作业过程中冰雹云的微物理特征变化、影响机制等进行分析,今后仍需进一步收集更多个例,并利用多种资料对冰雹云宏微物理结构、防雹后作业效果等进行综合分析,以提高人工防雹作业效果,有效减少雹灾造成的损失。

参考文献

- [1] 赵金涛,岳耀杰,王静爱,等. 1950—2009年中国大陆地区冰雹灾害的时空格局分析. 中国农业气象, 2015, 36(1): 83-92.
- [2] Battaglia M, Lee C, Thomason W, et al. Hail damage impacts on corn productivity: A review. *Crop Science*, 2019, 59(1): 1-14.
- [3] Yue Y, Zhou L, Zhu A, et al. Vulnerability of cotton subjected to hail damage. *PLoS One*, 2019, 14(1): e0210787.
- [4] Allen J T, Giammanco I M, Kumjian M R, et al. Understanding hail in the earth system. *Reviews of Geophysics*, 2020, 58(1): e2019RG000665.
- [5] 热苏力·阿不拉,牛生杰,张磊,等. 基于多普勒天气雷达的冰雹云早期识别与预警方法研究. 冰川冻土, 2017, 39(3): 641-650.
- [6] 曾勇,万雪丽,李丽丽,等. 一次多单体冰雹天气过程的雷达回波与闪电特征分析. 暴雨灾害, 2020, 39(3): 250-258.
- [7] 杨宁,苏德斌,苏立娟,等. 冰雹云探测技术研究进展——基于巴彦淖尔人工防雹技术研究试验. 气象科技进展, 2021, 11(5): 141-148.
- [8] 李红斌,胡志群,张靖萱. 一次强雹云过程冰雹增长机制分析及防雹探讨. 自然灾害学报, 2021, 30(5): 64-71.
- [9] 许志丽,苏立娟. 内蒙古中部地区冰雹云闪电特征及其防雹应用分析. 干旱区资源与环境, 2020, 34(11): 155-161.
- [10] 诸嘉根,邹琴. 隆德县10年防雹效果检验. 新疆气象, 1991, (6): 25-27.
- [11] 秦长学,刘玉超. 北京市高炮防雹效果和经济效益分析. 中国减灾, 2001, 11(2): 38-39, 43.
- [12] 李斌,郑博华,朱思华. 新疆重点雹区防雹作业效果检验评估. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(2): 116-122.
- [13] 王黎俊,银燕,郭三刚,等. 基于气候变化背景下的人工防雹效果统计检验:以青海省东部农业区为例. 大气科学学报, 2012, 35(5): 524-532.
- [14] 詹莹玉,钟韬,张正国,等. 百色市一次人工防雹过程分析. 广东气象, 2021, 43(1): 57-60.
- [15] 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.
- [16] 付双喜,安林,康凤琴,等. VIL在识别冰雹云中的应用及估测误差分析. 高原气象, 2004, 23(6): 810-814.
- [17] 王昂生,黄美元,徐乃璋,等. 冰雹云物理发展过程的一些研究. 气象学报, 1980, 38(1): 64-72.
- [18] 田涵元,王福增,王秋淞,等. 贵州地区强对流天气防雹雷达回波特征研究. 成都信息工程大学学报, 2022, 37(2): 208-214.
- [19] 邝美清,张家斌,王丹平. 2020年3月22日三明市人工防雹作业技术及效果评价. 海峡科学, 2020, (9): 21-26.
- [20] 樊志超,高继林. 湘西北山区人工防雹作业个例分析. 安徽农业科学, 2011, 39(33): 20861-20866.
- [21] 周长青,徐靖宇,唐明晖,等. 多普勒雷达产品在湘南一次人工防雹作业中的应用. 农学学报, 2018, 8(4): 71-74.
- [22] 宋建予. 豫西山区一次典型防雹作业方案设计及其效果评估. 气象与环境科学, 2012, 35(3): 59-65.
- [23] 刘昭武,田世芹,王凤娇,等. 一次冰雹过程的对流单体识别与防雹效果分析. 气象与环境学报, 2020, 36(3): 10-16.
- [24] 刘彦忠,康凤琴,安林,等. 再议青藏高原东北边缘及毗邻地区人工防雹消雹工作的意义. 干旱气象, 2006, 24(3): 75-83.
- [25] 赵仕雄. 青海高原冰雹的研究. 北京: 气象出版社, 1991.
- [26] 林春英,王黎俊,韩辉邦,等. 青海省冰雹特征分析. 现代农业科技, 2016, (18): 173-175.
- [27] 孙继松. 强对流天气预报的基本原理与技术方法. 北京: 气象出版社, 2014.
- [28] 张国庆,刘蓓. 青海省冰雹灾害分布特征. 气象科技, 2006, 34(5): 558-562.
- [29] 林春英,王启花,李红梅,等. 青海省东部农业区近60 a降雹特征及其致灾危险性. 干旱气象, 2022, 40(3): 436-443.
- [30] 许焕彬,段英,刘海月. 雹云物理与防雹的原理和设计对流云物理与防雹增雨//雹云物理与防雹的原理和设计,对流云物理与防雹增雨. 北京: 气象出版社, 2006.
- [31] 郭学良. 大气物理与人工影响天气. 北京: 气象出版社, 2010.
- [32] 王芳,范思睿,吕明,等. 川西地区一次人工防雹的分析与研究. 高原山地气象研究, 2017, 37(1): 84-88.
- [33] 黄美元,王昂生. 人工防雹导论. 北京: 科学出版社, 1980.